

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Г.Ф. МОРОЗОВА»

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Материалы Национальной научно-практической конференции

Воронеж, 18 марта 2026 г.

Воронеж 2026

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION  
OF THE RUSSIAN FEDERATION  
FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION  
OF HIGHER EDUCATION  
«VORONEZH STATE UNIVERSITY OF FORESTRY AND TECHNOLOGIES  
NAMED AFTER G.F. MOROZOV»

INDUSTRIAL THERMAL POWER ENGINEERING

Materials of the National Scientific and Practical Conference

Voronezh, March 18, 2026

Voronezh 2026

УДК 620.9

П81

**П81** Промышленная теплоэнергетика : материалы Национальной научно-практической конференции, Воронеж, 18 марта 2026 г. / отв. ред. С. В. Внукова ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2026. – 243 с. – URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2026/nacionalnaya-nauchno-prakticheskaya-konferenciya-promyshlennaya-teploenergetika/>. – Текст : электронный.

ISBN 978-5-7994-1237-1

В сборнике представлены материалы Национальной научно-практической конференции «Промышленная теплоэнергетика», прошедшей 18 марта 2026 года в ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». Конференция проведена в целях определения и систематизации актуальных проблем и тенденций развития в сфере инноваций и цифровых технологий в промышленной теплоэнергетике, ознакомления с результатами научной работы ученых, преподавателей и обучающихся; популяризации инновационных и прогрессивных технологий в промышленном теплоэнергетическом комплексе; установления научных, образовательных и практических контактов, привлечения студентов к научным исследованиям, повышения мотивации обучающихся к более глубокому изучению общетехнических дисциплин.

Материалы конференции предназначены для специалистов теплоэнергетической отрасли и широкого круга читателей.

УДК 620.9

ISBN 978-5-7994-1237-1

© ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Митрофанов В.А.</b> Метод проектирования тепло-масообменных устройств.....	6
<b>Анпилогов М.И., Надеев А.А.</b> Экспериментальное исследование зависимости гидравлического сопротивления слоя материала от размера частиц в дисперсной системе.....	11
<b>Афоничев Д.Н., Васильев В.В., Пиляев В.С.</b> Усовершенствованный электрический трактор.....	18
<b>Баскакова А.Р., Стородубцева Т.Н., Шакирова О.И.</b> Автоматизация и управление энергетическими системами в ресурсосберегающих технологиях: экологические проблемы и безопасность техносферы.....	24
<b>Бурмистрова О.Н., Чемшикова Ю.М.</b> Биоэнергетика как отрасль энергетики.....	29
<b>Васильев В.В., Афоничев Д.Н.</b> Расчет технических характеристик серводвигателя, предназначенного для перемещения робота в теплице.....	34
<b>Вернигора Е.Р., Иванников В.А., Швырев А.Н., Снятков Е.В., Махачов Ш.М.</b> Применение методов тепломассообмена для оперативного контроля деградации гидравлических масел.....	40
<b>Внукова С.В., Матвеев Н.Н., Лисицын В.И.</b> Теплофизические аспекты кристаллизации полимеров и их связь с дипольными характеристиками макромолекул.....	49
<b>Говоруха Т.Ю., Стородубцева Т.Н., Гоптарев С.М.</b> Балансы и низкотоварная древесина как возобновляемые источники энергии.....	56
<b>Гоголев В.А., Солженикин П.А., Черниченко В.В., Хрипунов К.Г.</b> Использование отработавшего ядерного топлива в реакторах типа БН.....	62
<b>Елатонцев Д.Р., Солженикин П.А., Надеев А.А., Наумов А.М.</b> Проблемы и перспективы развития ветроэнергетики в России.....	67
<b>Ерофеев М.С., Солженикин П.А., Портнов В.В., Дубанин В.Ю.</b> Использование различных сельскохозяйственных отходов как источника биогаза.....	72
<b>Кадырметов А.М., Бухтояров В.Н., Иванников В.А., Голев А.Д.</b> Моделирование тепловых процессов при нанесении плазменных покрытий с использованием прямой и косвенной дуги.....	77
<b>Коновалов Д.А., Гашо Е.Г., Коновалова М.Д., Орехова М.Т., Маслов К.А.</b> Оценка резервов повышения энергоэффективности зданий и высвобождения мощности тепловых сетей.....	84
<b>Кочетова Ж.Ю., Внукова С.В., Тронин А.Л.</b> Экотеплоснабжение от ЦОД: моделирование и анализ.....	93
<b>Кочин А.Е., Муравьев А.В., Осипенко О.А., Нерсесян Л.С.</b> Построение системы АСУ ТП и ее роль в современной промышленности.....	99

<b>Кулакова В.А., Кожухов Н.Н.</b>	
Эволюция энергоблоков АЭС: автоматизация ВВЭР-ТОИ.....	104
<b>Ларионов А.Н., Машин В.Н., Чёнгин В.Ю., Машина А.В.</b>	
Математическое моделирование процесса прогрева углеродосодержащего материала.....	108
<b>Латынин А.В., Лушникова Е.Н., Швырев А.Н., Швырев С.А., Тиньков А.А.</b>	
Перспективы развития технологии физической модификации полимерных клеев.....	114
<b>Лисицын В.И., Матвеев Н.Н., Евсикова Н.Ю., Камалова Н.С., Внукова С.В.</b>	
Моделирование динамики роста второстепенных (побочных) древесных насаждений и объектов в древостоях.....	121
<b>Лушникова Е.Н., Тиньков А.А., Внукова С.В.</b>	
Экспериментальное исследование контактного термического сопротивления в разъемных соединениях из разнородных металлов с сетчатыми заполнителями.....	130
<b>Мещеряков А.В., Задиранов А.Н., Сухих С.В., Птицын В.В.</b>	
Оценка пожарных рисков при производстве полимерных смол.....	136
<b>Муравьев А.В., Кочин А.Е., Сагайдак С.А., Лубашев А.В., Дзигонский Р.К.</b>	
Автоматизация и управление энергетических систем.....	142
<b>Панченко С.Л., Хрипченко М.С., Новиков А.П., Толстов С.А., Толстова А.С.</b>	
Интенсификация процесса теплопередачи в кожухотрубчатых теплообменных аппаратах.....	147
<b>Попова А.Р., Акиншина К.С., Внукова С.В., Баранов П.А.</b>	
Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на предприятиях деревоперерабатывающего комплекса.....	154
<b>Портнов В.В., Орловцева О.А.</b>	
Перспективы применения теплонасосных установок для теплоснабжения в индивидуальном жилищном строительстве.....	160
<b>Прищепенко В.Ю., Внукова С.В.</b>	
Повышение энергоэффективности топливоиспользующих установок за счет СВЧ-контроля свободной влаги.....	167
<b>Рыжков В.В., Кольцова А.В., Золотарев А.В.</b>	
Летательные аппараты на солнечной энергии.....	173
<b>Сидорова М.А., Орловцева О.А., Портнов В.В.</b>	
Перспективы применения обратноосмотических фильтров для водоподготовки котельных жилых комплексов.....	178
<b>Соловьева В.Д., Черных Д.А., Внукова С.В., Дружинина Е.В.</b>	
Концептуальные основы интеграции техносферной безопасности в парадигму развития теплоэнергетического комплекса.....	185
<b>Стородубцева Т.Н., Жабин Д.А., Жигунова Д.Э.</b>	
Анализ современных подходов к созданию «зеленых» композитов на основе металлургических шлаков как фактор энергоэффективности производства.....	192

<b>Стородубцева Т.Н., Морковин В.А., Никитский В.А.</b>	
Эволюция силовых и традиционных силовых установок.....	<b>199</b>
<b>Стородубцева Т.Н., Муждаба З.М., Черников Э.А.</b>	
Сравнение эффективности основных видов нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.....	<b>205</b>
<b>Стородубцева Т.Н., Шабанов М.Л., Ткачѳв Д.А.</b>	
Автоматизированный контроль качества утилизации полимерных композиционных материалов в составе цементных систем.....	<b>210</b>
<b>Тертерашвили Д.Г., Дорохин С.В.</b>	
Влияние теплового режима работы двигателя внутреннего сгорания на его ресурс и надежность.....	<b>218</b>
<b>Толстов С.А., Панченко С.Л., Толстова А.С., Набатов Д.Р., Трощенко Р.В., Узунов К.А.</b>	
Разработка схемы по исследованию работы инжекторного двигателя ВАЗ 2105 на смеси с водяным паром.....	<b>226</b>
<b>Ященко С.М.</b>	
Влияние процесса теплообмена на кристаллизацию жидкости.....	<b>235</b>

## МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛО-МАСООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ DESIGN METHOD FOR HEAT AND MASS EXCHANGE DEVICES

**Митрофанов В.А.**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия  
**Mitrofanov V.A.**, DrSc in Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Аннотация.** На основе преобразований и интегрирования упрощенной системы дифференциальных уравнений переноса скалярной и векторной величины в потоке жидкости или газа обоснованы интегральные критерии, влияющие на протекание процессов в тепло-массообменных устройствах и на распределение температуры, концентрации и скорости в потоке. Получены аналитические зависимости, связывающие габариты проточной части, гидродинамические и термодинамические параметры с профилем температуры, концентрации и скорости. Использование материалов, изложенных в статье, упростит процесс создания и доводки тепло-массообменного устройства и даст возможность оптимизации его геометрии.

**Ключевые слова:** тепло-массообменное устройство, распределение параметров, размеры проточной части.

**Abstract.** Based on the transformations and integration of a simplified system of differential equations of the transfer of a scalar and vector quantity in a fluid or gas flow, integral criteria are substantiated that affect the course of processes in heat and mass exchange devices and the distribution of temperature, concentration and velocity in the flow. Analytical dependencies have been obtained that relate the dimensions of the flow part, hydrodynamic and thermodynamic parameters, to the temperature, concentration and velocity profile. The use of the materials presented in the article will simplify the process of creating and fine-tuning a heat and mass transfer device and will give the opportunity to optimize its geometry.

**Keywords:** heat and mass transfer device, parameter distribution, flow part dimensions.

При проектировании устройств и аппаратов, предназначенных для преобразования энергии из одного вида в другой (газотурбинные двигатели, топочные устройства и т.п.) и использующих в качестве рабочего тела движущуюся сплошную среду – газ или жидкость, отсутствуют методы упрощенной оценки структуры потока в проточной части устройства. При наличии таких методов возможно определение размеров проточной части по заданным параметрам в различных точках пространства, занимаемого потоком, и оптимизация геометрии устройства или аппарата.

Рассмотрим упрощенную систему дифференциальных уравнений переноса тепла, концентрации, импульса (при отсутствии внешних сил) для потока жидкости или газа [1-4]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho w \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\lambda}{c_p} \Delta T &= \frac{q}{c_p}; \\ \rho \frac{\partial [c]}{\partial t} + \rho u \frac{\partial [c]}{\partial x} + \rho v \frac{\partial [c]}{\partial y} + \rho w \frac{\partial [c]}{\partial z} - \rho \cdot D \cdot \Delta [c] &= g; \\ \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} - \eta \Delta \mathbf{v} &= -\nabla p, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность потока;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости потока;  $u, v, w$  – проекции вектора скорости потока газа на оси координат;  $t$  – время;  $\eta, \lambda, D$  – коэффициент динамической вязкости, теплопроводности, диффузии соответственно;  $T$  – температура;  $q, g$  – подводимое к потоку (отводимое от потока) тепло, вещество;  $c_p$  – удельная теплоемкость (при постоянном давлении);  $[c]$  – относительная концентрация (массовая доля вещества в потоке);  $\Delta, \nabla$  – дифференциальные операторы Лапласа и Гамильтона.

Система (1) дополняется уравнением неразрывности и уравнением, связывающим термодинамические параметры газа.

Обозначим в (1) переменные  $T, [c]$  и  $u, v, w$  – через  $\psi_i$ ;  $\frac{\lambda}{c_p}, \rho \cdot D, \eta$  – через  $\sigma_i$ ;  $q, g, (-\nabla p)$  – через  $S_{\psi_i}$ .

Выделим в потоке элементарный параллелепипед объемом  $dV = dx dy dz$ , диагональ которого совпадает с направлением вектора скорости.

Умножим левую и правую часть (1) на величину этого объема.

Для слагаемых левой части (1) имеем:

$$\rho \frac{\partial \psi_i}{\partial t} dx dy dz + \rho u dy dz \frac{\partial \psi_i}{\partial x} dx + \rho v dx dz \frac{\partial \psi_i}{\partial y} dy + \rho w dx dy \frac{\partial \psi_i}{\partial z} dz.$$

Введем понятие массового расхода  $dG$  через элемент поверхности  $df$ , нормальной к направлению вектора скорости потока:

$$dG = \rho |\mathbf{v}| df.$$

Примем  $df$  равной проекции площади грани элементарного параллелепипеда на плоскость, нормальную вектору скорости:

$$df = dy dz \cos(x, \mathbf{v}) = dx dz \cos(y, \mathbf{v}) = dx dy \cos(z, \mathbf{v}).$$

Так как

$$|\mathbf{v}| = \frac{u}{\cos(x, \mathbf{v})} = \frac{v}{\cos(y, \mathbf{v})} = \frac{w}{\cos(z, \mathbf{v})}$$

то

$$dG = \rho u dy dz = \rho v dx dz = \rho w dx dy.$$

Вынося за скобки  $dG$ , исходное соотношение перепишем в виде:

$$dG \left( \frac{\partial \psi_i}{\partial t} dt + \frac{\partial \psi_i}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} dy + \frac{\partial \psi_i}{\partial z} dz \right) - \sigma_i \cdot \Delta \psi_i dV = S_{\psi_i} \cdot dV.$$

Используя выражения для полного дифференциала функции:

$$dG \left( \frac{\partial \psi_i}{\partial t} dt + d\psi_i \right) - \sigma_i \cdot \Delta \psi_i dV = S_{\psi_i} \cdot dV,$$

где

$$d\psi_i = \frac{\partial\psi_i}{\partial x} dx + \frac{\partial\psi_i}{\partial y} dy + \frac{\partial\psi_i}{\partial z} dz$$

интегрируем преобразованное исходное уравнение в пределах:

$$\int_G dG \left( \int_{\delta t} \frac{\partial\psi_i}{\partial t} dt + \int_{\delta\psi_i} d\psi_i \right) - \int_S \sigma_i \frac{\partial\psi_i}{\partial \mathbf{n}} dS = \int_V S_{\psi_i} \cdot dV,$$

применяя формулу Грина к слагаемому левой части:

$$\int_V \sigma_i \cdot \Delta\psi_i dV = \int_S \sigma_i \frac{\partial\psi_i}{\partial \mathbf{n}} dS,$$

где  $\mathbf{n}$  – нормаль к этой поверхности;  $\delta_L\psi_i$  – изменение  $\psi_i$  от рассматриваемого сечения до сечения входа:  $\delta_L\psi_i = \psi_i - \psi_{i0}$ ;  $\psi_{i0}$  – значение в сечении входа в рассматриваемый объем;  $G$  – массовый расход жидкости или газа через объем  $V$ ;  $\delta t$  – промежуток времени;  $S$  – площадь, охватывающая рассматриваемый объем.

После интегрирования и преобразований:

$$\frac{G}{V} (\delta_t\psi_i + \delta_L\psi_i) \frac{V}{S} - \sigma_i \cdot \left( \frac{\partial\psi_i}{\partial \mathbf{n}} \right)_m = (S_{\psi_i})_m \cdot \frac{V}{S}, \quad (2)$$

где

$$\delta_t\psi_i = \int_{\delta t} \frac{\partial\psi_i}{\partial t} dt = \left( \frac{\partial\psi_i}{\partial t} \right)_m \delta t.$$

Величина  $\delta_t\psi_i$  характеризует нестационарную составляющую. Параметры с индексом «m» обозначают средние величины в соответствии с теоремой о среднем значении определенного интеграла.

Умножим правую и левую часть (2) на величину  $\delta N$ , отсчитываемую вдоль нормали к поверхности, ограничивающей объем, где  $N = \frac{V}{S - \sum F_{oi}}$ ;  $\sum F_{oi}$  – сумма площадей входа и выхода в этот объем.

С учетом

$$\frac{V}{S} \cdot \delta N \sim \delta N^2 \text{ и } \delta_n\psi_i = \left( \frac{\partial\psi_i}{\partial \mathbf{n}} \right)_m \delta N,$$

после преобразований получим интегральную форму уравнений (1):

$$\frac{G}{V} (\delta_t\psi_i + \delta_L\psi_i) = (S_{\psi_i})_m \cdot \left( 1 - \left( \frac{\sigma_i}{G/V \cdot a \cdot \delta N^2} \right) \cdot \frac{\delta_n\psi_i}{\delta_t\psi_i + \delta_L\psi_i} \right)^{-1},$$

где  $\delta_n\psi_i$  – изменение  $\psi_i$  вдоль нормали к поверхности:  $\delta_n\psi_i = \psi_{is} - \psi_i - \delta_t\psi_i$ ;  $\psi_{is}$  – значение на границе поверхности, ограничивающей объем,

Решая данное уравнение относительно  $\psi_i + \delta_t\psi_i$ , с учетом

$$\delta N^2 = N^2(1 - \bar{n}^2),$$

$$\bar{n} = \frac{n}{N}$$

получаем:

$$\psi_i + \delta_t\psi_i = \frac{(S_{\psi_i})_m \cdot N^2 \cdot (1 - \bar{n}^2) + \psi_{i0} \cdot \frac{1}{\sigma_i} \cdot \frac{G}{V} \cdot N^2 \cdot (1 - \bar{n}^2) + \psi_{is}}{\left( 1 + \frac{1}{\sigma_i} \cdot \frac{G}{V} \cdot N^2 \cdot (1 - \bar{n}^2) \right)} \quad (3)$$

или

$$\psi_i + \delta_t \psi_i = \frac{\frac{(S\psi_i)_m}{G/V} + \frac{\sigma_i}{G/V \cdot N^2 \cdot (1-\bar{n}^2)} \cdot \psi_{iS} + \psi_{i0}}{1 + \frac{\sigma_i}{G/V \cdot N^2 \cdot (1-\bar{n}^2)}}, \quad (3a)$$

где  $n$  – текущая координата, отсчитываемая вдоль нормали к ограничивающей рассматриваемый объем поверхности;  $\psi_{i0} = \psi_{i0}(x, y, z)$  для сечения входа;  $\psi_{iS} = \psi_{i0}(x_S, y_S, z_S)$ ;  $x_S, y_S, z_S$  – координаты точки поверхности  $S$ . Значения параметров в правой части (3) и (3a) соответствуют фиксированному моменту времени.

Безразмерный комплекс  $\frac{1}{\sigma_i} \cdot \frac{G}{V} \cdot N^2$  в (3) и (3a) определяет профиль температуры, концентрации и скорости в тепло-массообменном устройстве.

При  $\frac{1}{\sigma_i} \cdot \frac{G}{V} \cdot N^2 \rightarrow 0$  профиль  $\psi_i + \delta_t \psi_i = f(\bar{n})$  стремится к параболической форме (для скорости это профиль, соответствующий течению «Пуазейля»), при  $\frac{1}{\sigma_i} \cdot \frac{G}{V} \cdot N^2 \rightarrow \infty$  как показывают расчеты по (3) и (3a), профиль приближается к степенному.

В общем виде (3) и (3a) можно представить функцией:

$$\varphi \left( \psi_i + \delta_t \psi_i, \bar{n}, \frac{(S\psi_i)_m}{G/V}, \frac{G \cdot N^2}{\sigma_i \cdot V}, \psi_{iS}, \psi_{i0} \right) = 0. \quad (4)$$

Значение параметра  $N$  для некоторых частных случаев:

- цилиндрический канал постоянной геометрии:  $N = \frac{R}{2}$ ;
- кольцевой канал постоянной геометрии:  $N = \frac{h}{2}$ ,

где  $R, h$  – радиус цилиндрического канала и высота (толщина) кольцевого канала соответственно.

Поскольку  $\frac{G \cdot N^2}{\sigma_i \cdot V}$  определяет профиль скорости, следовательно и производную  $\frac{\partial v}{\partial n}$ , которая, согласно гипотезе Прандтля [2-4], связана с пульсационной составляющей скорости турбулентного течения. От пульсационной составляющей скорости потока зависят коэффициенты турбулентной теплопроводности, диффузии и вязкости.

Функцию (4), можно рассматривать, как математическую модель тепло-массообменного устройства. Критерии и параметры этой функции характеризуют: соотношение скорости подвода к потоку и отвода потоком тепла, вещества, импульса  $\frac{(S\psi_i)_m}{G/V}$ ; соотношение скорости конвективного и молекулярного переноса тепла, вещества, импульса  $\frac{G \cdot N^2}{\sigma_i \cdot V}$ , которое при заданных начальных  $\psi_{i0}$  и граничных  $\psi_{iS}$  параметрах отвечает за процесс формирования профиля температуры, концентрации, скорости в потоке.

В частности, скорость подвода к потоку тепла и вещества в таком тепло-массообменном устройстве, как камера сгорания газотурбинного (реактивного) двигателя, зависит от скорости химической реакции окисления углеводородного топлива [5, 6]. Как правило, эта скорость задается эмпирическими зависимостями от температуры, концентрации,

давления. Для камеры сгорания от критерия  $\frac{(S_{\psi i})_m}{G/V}$  зависит эффективность процесса горения (коэффициент полноты сгорания топлива), диапазон устойчивого горения и воспламенения топлива [5, 6]. Критерий  $\frac{G \cdot N^2}{\sigma_i \cdot V}$  влияет на неравномерность поля температуры газа в камере сгорания.

Получены соотношения (3), (3а) и обоснован критерий, с помощью которых устанавливается взаимосвязь габаритов проточной части тепло-массообменного устройства с распределением температуры, концентрации и скорости в нем. Использование этих соотношений при исследовании, моделировании, проектировании тепло-массообменных устройств повышает эффективность процесса их создания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2001 – 736 с.
2. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2000. – 576 с.
3. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа: учеб. для вузов / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Дрофа, 2003. – 840 с.
4. Турбулентность / П. Брэдшоу, Т. Себеси, Г. Г. Фернгольц [и др.]; Под ред. П. Брэдшоу, Пер. с англ. Н. Г. Васецкой [и др.], Под ред. А. С. Гиневского. – Москва : Машиностроение, 1980. – 343 с.
5. Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД / А. Лефевр; Пер. с англ. С. О. Апельбаума [и др.]; Под ред. В. Е. Дорошенко. – Москва : Мир, 1986. – 566 с.
6. Пчелкин, Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей: учеб. для вузов по спец. «Турбиностроение» / Ю. М. Пчелкин. – Москва : Машиностроение, 1984. – 280 с.

### REFERENCES

1. Landau, L. D. Theoretical Physics: textbook for universities. In 10 volumes. Vol. VI. Hydrodynamics / L. D. Landau, E. M. Livshits. – Moscow : FIZMATLIT, 2001 – 736 p.
2. Prandtl, L. Hydroaeromechanics / L. Prandtl. – Izhevsk : Research Center «Regular and Chaotic Dynamics», 2000. – 576 p.
3. Loitsyansky, L. G. Mechanics of liquid and gas: textbook for universities / L. G. Loitsyansky. – Moscow : Drofa, 2003. – 840 p.
4. Turbulence / P. Bradshaw, T. Sebesi, G. G. Fernholz [et al.]; Ed. by P. Bradshaw, Trans. from English by N. G. Vasetskaya [et al.], Ed. by A. S. Ginevsky. – Moscow : Mashinostroenie, 1980. – 343 p.
5. Lefebvre, A. Processes in the combustion chambers of Gas-Turbine Engines / A. Lefebvre; Translated from English by S. O. Apelbaum [et al.]; Edited by V. E. Doroshenko. – Moscow : Mir, 1986. – 566 p.
6. Pchelkin, Yu. M. Combustion chambers of gas turbine engines: textbook for universities on spec. «Turbine engineering» / Yu. M. Pchelkin. – Moscow : Mashinostroenie, 1984. – 280 p.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ  
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЛОЯ МАТЕРИАЛА  
ОТ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ В ДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ**

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE HYDRAULIC RESISTANCE OF  
A MATERIAL LAYER ON THE PARTICLE SIZE IN A DISPERSED SYSTEM**

**Анпилогов М.И.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Anpilov M.I.**, student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Надеев А.А.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Nadeev A.A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье приведены результаты экспериментального исследования зависимости гидравлического сопротивления неподвижного плотного и псевдооживленного слоя материала от размера частиц в дисперсной системе. Установлено, что гидравлическое сопротивление плотного слоя повышается с увеличением размера частиц и практически не зависит от него в псевдооживленном состоянии. Увеличение массы материала в рабочей камере приводит к повышению гидравлического сопротивления слоя. В псевдооживленном состоянии гидравлическое сопротивление слоя с увеличением скорости воздуха также медленно возрастает.

**Ключевые слова:** дисперсная система, дисперсный материал, псевдооживленный слой, гидравлическое сопротивление, размер частиц.

**Abstract.** The article presents the results of an experimental study of the dependence of the hydraulic resistance of a fixed dense and fluidized bed of a material on the particle size in a dispersed system. It has been found that the hydraulic resistance of the dense layer increases with increasing particle size and is practically independent of it in the fluidized state. An increase in the mass of the material in the working chamber leads to an increase in the hydraulic resistance of the layer. In the fluidized state, the hydraulic resistance of the layer also increases slowly with increasing air velocity.

**Keywords:** dispersed system, dispersed material, fluidized bed, hydraulic resistance, particle size.

Дисперсной называют такую систему нескольких веществ (тел), в которой одно из них равномерно распределено во всей массе (объеме) другого, при этом между ними отсутствует перемешивание и взаимодействие на химическом уровне. Примером такой системы является псевдооживленный слой, когда сквозь твердый сыпучий материал (дисперсная фаза) проходит

поток газа или жидкости (дисперсная среда), и частицы материала начинают интенсивно перемещаться одна относительно другой [1].

Одним из основных свойств слоя дисперсного материала, используемого в различных технологических установках, является его гидравлическое сопротивление, т.е. потери давления, возникающие в результате фильтрации газообразной среды через слой материала [2].

В данной работе рассматривается экспериментальный метод исследования зависимости гидравлического сопротивления слоя дисперсного материала от размера и формы его частиц, а также скорости газообразной среды (воздуха).

Схема стенда для исследования гидродинамических характеристик псевдоожиженного слоя представлена на рисунке 1.

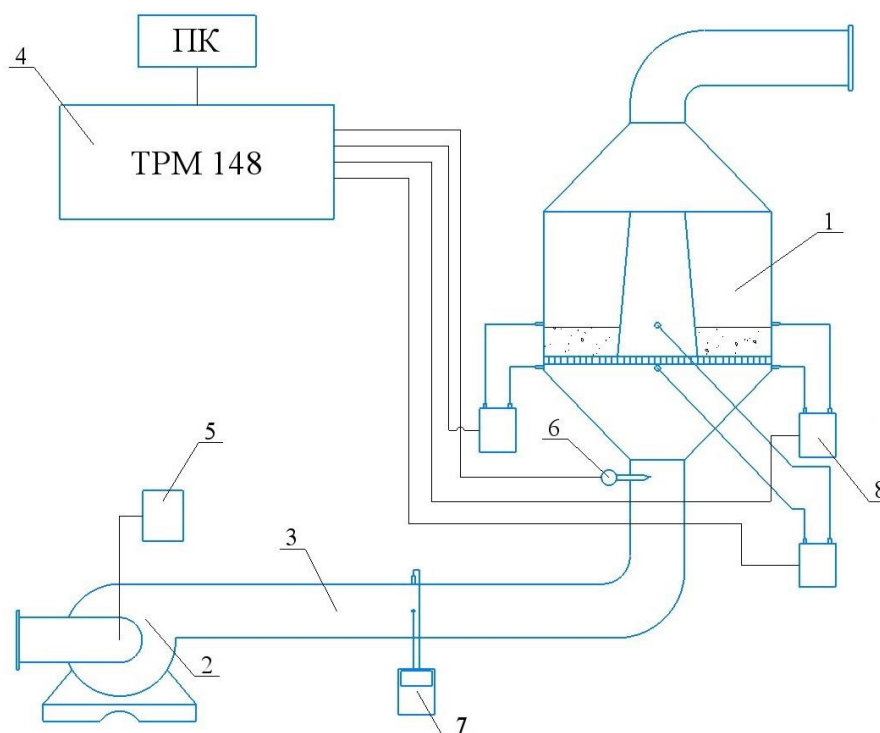


Рисунок 1 – Схема стенда для исследования гидродинамических характеристик псевдоожиженного слоя:

- 1 – установка с псевдоожиженным слоем; 2 – центробежный вентилятор;
- 3 – воздуховод; 4 – измеритель-регулятор; 5 – частотный преобразователь;
- 6 – датчик температуры; 7 – дифманометр; 8 – датчик дифференциального давления

Целью работы является получение экспериментальных данных по потерям давления при прохождении оживающей среды (воздуха) через слой дисперсного материала в зависимости от параметров воздуха и материала.

Параметры материала, влияющие на потери давления: тип материала – силикагель (шарообразная форма) и зерно (цилиндрическая форма); диаметр частиц силикагеля: 4-4,75 мм, 3,5-4 мм, 2,5-3,5 мм; диаметр частиц зерна – 3,5 мм. Так как согласно [1] количество материала в рабочей камере влияет на гидравлическое сопротивление, в экспериментах масса каждого материала имела значения 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 кг.

Так как испытательный стенд содержит поворот воздуховода на  $90^\circ$  перед входом в аппарат, воздушный поток может распределяться в расширяющейся части аппарата неравномерно, что в свою очередь может оказать влияние на величину гидравлического сопротивления материала по сечению рабочей камеры. Поэтому на стенде установлено три датчика дифференциального давления 8, которые позволяют фиксировать потери давления в трех точках. Датчики имеют унифицированный выходной сигнал 4-20 мА и подключены к вторичному цифровому прибору 4. Скорость воздуха, подаваемого в аппарат вентилятором 2, регулировалась частотным преобразователем 5 и фиксировалась с помощью комплекта, включающего пневмометрические трубки и дифференциальный микроманометр.

Так как датчики дифференциального давления позволяют фиксировать только суммарные потери давления газораспределителя рабочей камеры и находящегося в ней дисперсного материала, необходимо получить данные по гидравлическому сопротивлению газораспределителя в зависимости от скорости воздуха [3]. Для этого была проведена первая серия опытов без использования материала. Ее результаты приведены на рисунке 2.

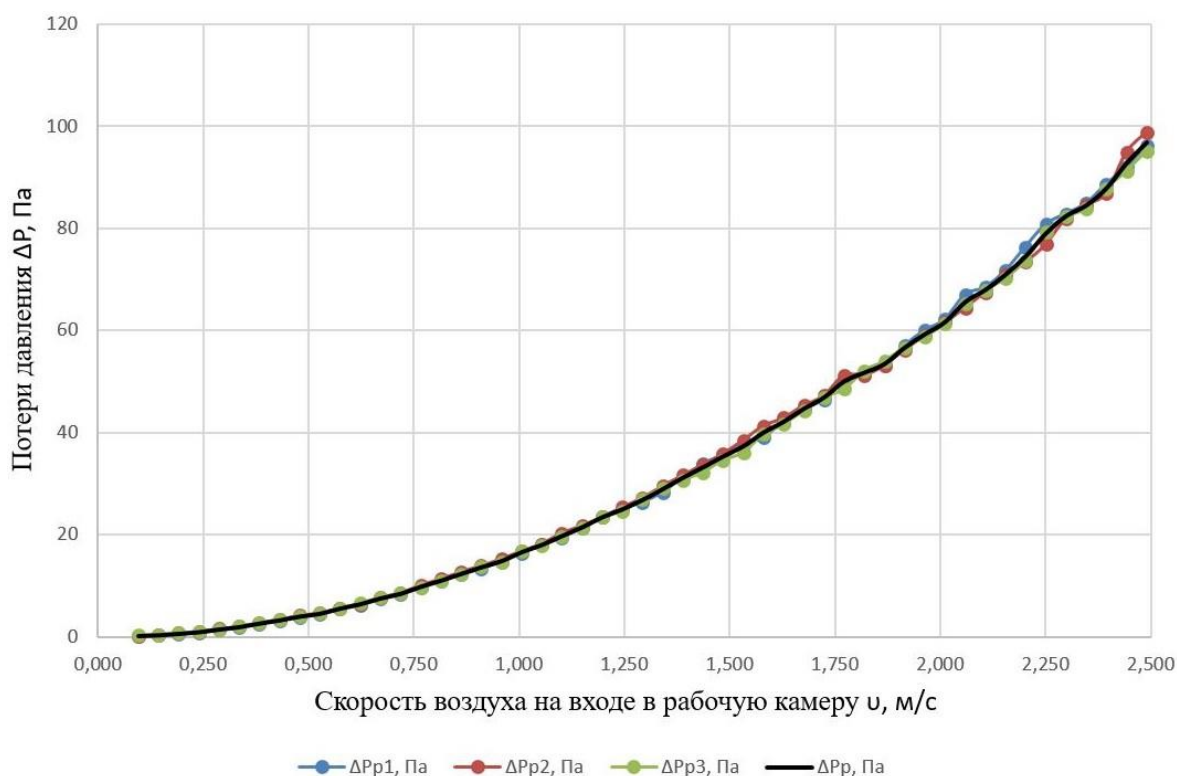


Рисунок 2 – Гидравлическое сопротивление газораспределителя:  
 $\Delta P_{p1}$ ,  $\Delta P_{p2}$ ,  $\Delta P_{p3}$  – показания соответствующих датчиков давления;  
 $\Delta P_p$  – усредненные значения

Данная серия также позволила установить отклонение показаний трех датчиков давления. Из рисунка 2 видно, что их показания имеют незначительное отклонение, при этом максимальное значение наблюдаются при высоких скоростях воздуха. Это позволило сделать вывод, что скорость воздуха распределена по сечению аппарата относительно равномерно и можно использовать усреднённое значение скорости.

Во второй серии опытов измерялись суммарные потери давления в зависимости от скорости воздуха и массы материала [4]. Результаты данной серии для силикагеля диаметром 4-4,75 мм приведены на рисунке 3. Здесь  $\Delta P_c[0,6]$ , ...,  $\Delta P_c[1,4]$  – потери давления для соответствующих масс материала, которые определялись как разница суммарных потерь и сопротивления газораспределителя.

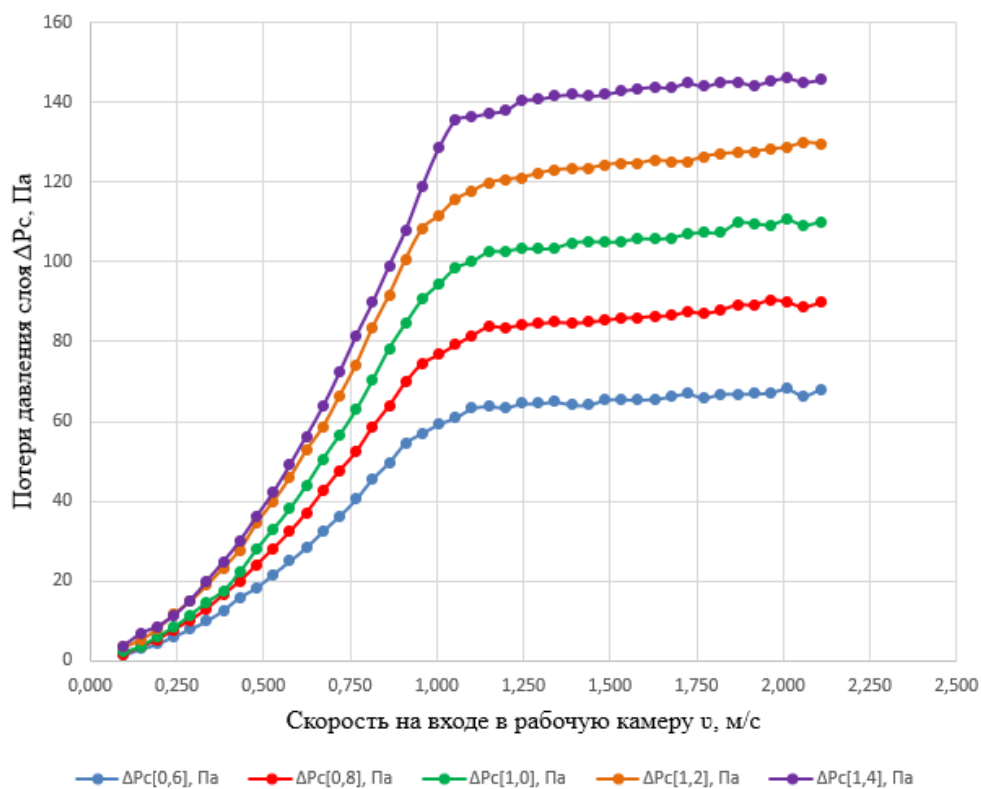


Рисунок 3 – Гидравлическое сопротивление слоя силикагеля различной массы

Из рисунка 3 видно, что потери давления увеличиваются с ростом как скорости воздуха, так и массы материала. При этом можно выделить два диапазона. Первый диапазон при скорости воздуха до 1-1,1 м/с характерен для неподвижного слоя материала. Второй диапазон иллюстрирует потери давления дисперсного материала в псевдооживленном состоянии, величина которых практически не зависит от скорости воздуха. Таким образом значение скорости 1-1,1 м/с можно считать скоростью начала псевдооживления [1].

Так как в опытах применялся силикагель разных фракций, а также зерно, были получены суммарные потери давления и потери давления материала для всех исследуемых масс. На рисунках 4-7 приведены результаты опытов для масс 0,6 и 1,4 кг. На данных рисунках приняты обозначения:  $\Delta P[4 - 4,75]$ ,  $\Delta P[3,5 - 4]$ ,  $\Delta P[2,5 - 3,5]$  – суммарные потери давления для силикагеля соответствующих фракций;  $\Delta P_c[4 - 4,75]$ ,  $\Delta P_c[3,5 - 4]$ ,  $\Delta P_c[2,5 - 3,5]$  – потери давления слоя силикагеля;  $\Delta P$  – суммарные потери давления для зерна;  $\Delta P_c$  – потери давления слоя зерна.

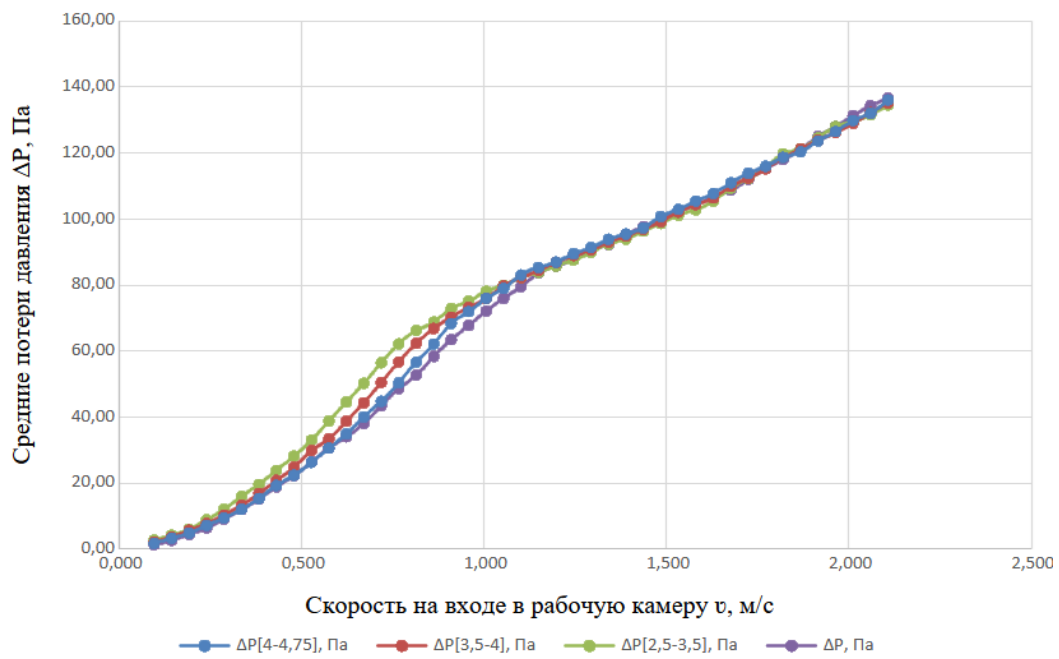


Рисунок 4 – Суммарные потери давления для 0,6 кг

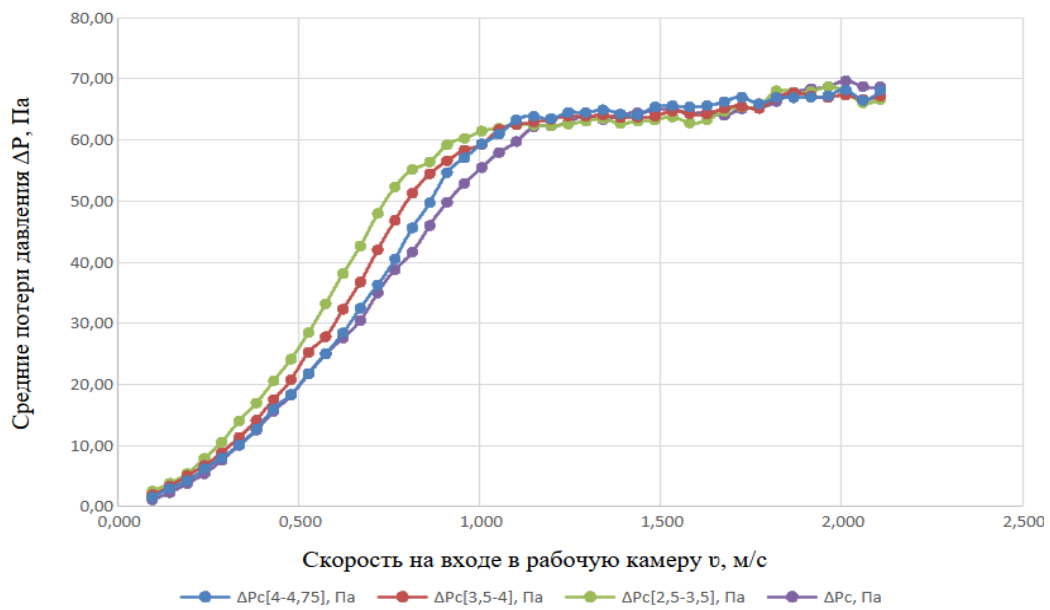


Рисунок 5 – Потери давления слоя материала для 0,6 кг

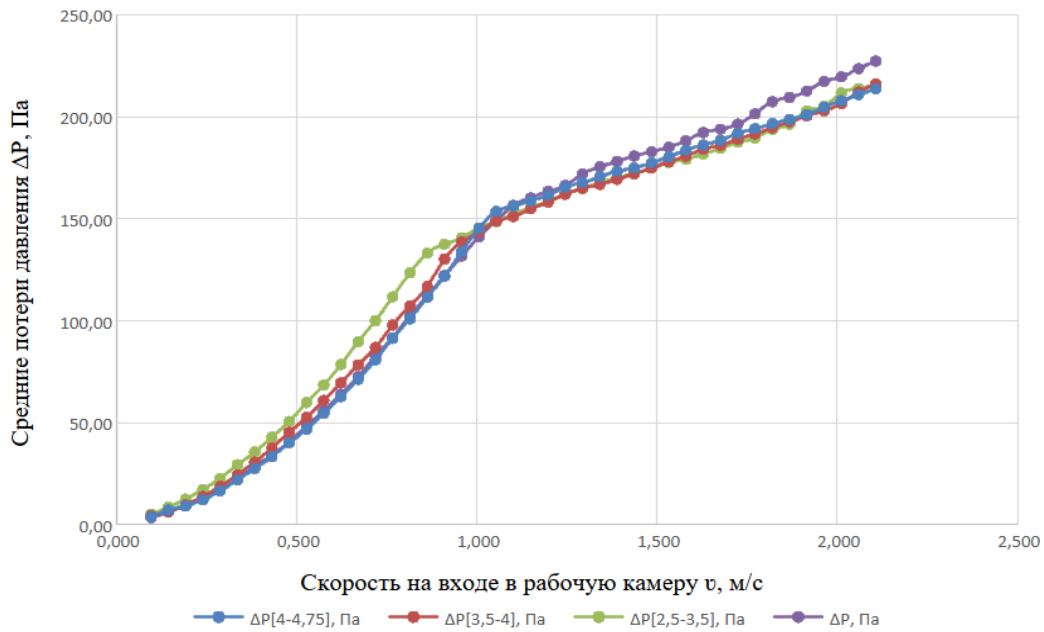


Рисунок 6 – Суммарные потери давления для 1,4 кг

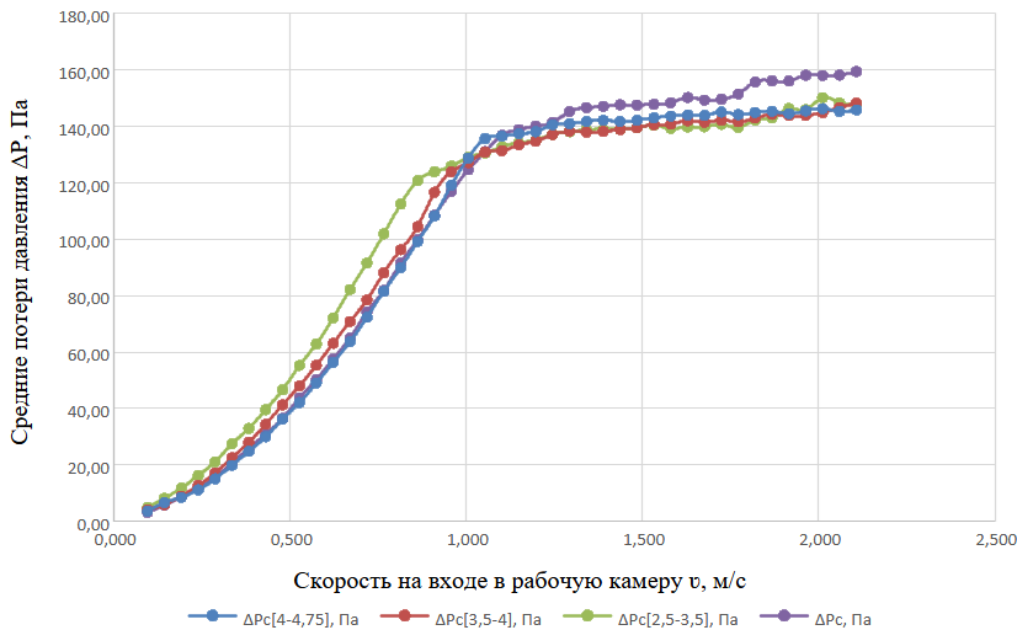


Рисунок 7 – Потери давления слоя для 1,4 кг

Из данных рисунков видно, что размер частиц силикагеля влияет на потери давления только в первом диапазоне скорости, т.е. пока слой неподвижен. При этом видно, что чем больше размер частиц материала, тем меньше потери давления. При переходе материала в псевдооживенное состояние сопротивление практически одинаково на всем диапазоне скоростей. Это наблюдается для всех исследованных масс материала.

Зерно массой 0,6 кг имеет аналогичное значение потерь давления в псевдооживенном состоянии, но в неподвижном состоянии сопротивление ниже, чем сопротивление силикагеля самой крупной фракции. Однако при массе 1,4 кг видно, что потери давления слоя зерна

превышают потери давления слоя силикагеля в псевдооживленном состоянии (рисунок 6-7). Это связано с тем, что плотность зерна отличается от плотности силикагеля.

Полученные результаты показывают, что размер частиц дисперсного материала влияет на потери давления только, пока слой находится в неподвижном состоянии. При этом скорость начала псевдооживления практически равна для всех размеров частиц. Таким образом, можно сделать вывод, что для аппаратов с псевдооживленным слоем влиянием размера частиц на потери давления можно пренебречь. Отличие потерь давления зерна от силикагеля связано с формой частиц и более высокой плотностью зерна [5].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельперин, Н. И. Основы техники псевдооживления / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша. – Москва : Химия, 1967. – 664 с.
2. Gibilaro, L. G. Fluidization Dynamics / L. G. Gibilaro. – Butterworth-Heinemann, 2001. – 256 p.
3. Агапов, Д. Ю. Экспериментальное сравнение газораспределительных устройств для формирования центробежного слоя / Д. Ю. Агапов, А. А. Надеев, К. Н. Родионов [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 7-1. – С. 118-121.
4. Агапов, Ю. Н. Экспериментальное исследование гидродинамики регенеративного воздухоподогревателя для котлоагрегата малой производительности / Ю. Н. Агапов, В. Г. Стогней, М. А. Хаустов, С. И. Некрасов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 5. – С. 11-13.
5. Агапов, Ю. Н. Влияние высоты псевдооживленного слоя на параметры газораспределительной решетки / Ю. Н. Агапов, В. И. Лукьяненко, А. П. Бырдин, В. Г. Стогней // Вестник ВГТУ. Серия: Энергетика. – 2006 – Т. 2, № 6. – С. 139-143.

### REFERENCES

1. Gelperin, N. I. Fundamentals of fluidization technology / N. I. Gelperin, V. G. Einstein, V. B. Kvasha. – Moscow : Khimiya, 1967. – 664 p.
2. Gibilaro, L. G. Fluidization Dynamics / L. G. Gibilaro. – Butterworth-Heinemann, 2001. – 256 p.
3. Agapov, D. Yu. Experimental comparison of gas distribution devices for the formation of a centrifugal layer / D. Yu. Agapov, A. A. Nadeev, K. N. Rodionov [et al.] // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2012. – Vol. 8, No. 7-1. – P. 118-121.
4. Agapov, Yu. N. Experimental study of the hydrodynamics of a regenerative air heater for a low-capacity boiler / Yu. N. Agapov, V. G. Stogney, M. A. Khaustov, S. I. Nekrasov // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2010. – Vol. 6, No. 5. – P. 11-13.
5. Agapov, Yu. N. Influence of the height of the fluidized bed on the parameters of the gas distribution grid / Yu. N. Agapov, V. I. Lukyanenko, A. P. Byrdin, V. G. Stogney // Bulletin of VSTU. Series: Energy. – 2006 – Vol. 2, No. 6. – P. 139-143.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАКТОР

### ADVANCED ELECTRIC TRACTOR

**Афоничев Д.Н.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и автоматики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I», Воронеж, Россия

**Afonichev D.N.**, DrSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

**Васильев В.В.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I», Воронеж, Россия

**Vasiliev V.V.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

**Пиляев В.С.**, аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I», Воронеж, Россия

**Pilyaev V.S.**, Postgraduate student, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

**Аннотация.** Представлен усовершенствованный электрический трактор, предназначенный для выполнения различных сельскохозяйственных работ. Сзади рамы этого трактора закреплен электродвигатель для привода навесного и прицепного оборудования, который включается в электрические цепи питания и управления тяговых электродвигателей так, чтобы частота вращения ротора данного электродвигателя была в линейной зависимости от частоты вращения роторов тяговых электродвигателей. Такое техническое решение позволяет обеспечить надлежащее качество выполнения технологических операций и снизить затраты энергии.

**Ключевые слова:** электрический трактор, шасси, масляный насос, электродвигатель, тяговый электропривод, аккумуляторная батарея, гидроцилиндр, навеска.

**Abstract.** An advanced electric tractor designed to perform various agricultural works is presented. Behind the frame of this tractor, an electric motor is fixed to drive attachments and trailed equipment, which is connected to the electric power and control circuits of traction motors so that the rotation speed of the rotor of this electric motor is in linear dependence on the rotation speed of the rotors of traction electric motors. Such a technical solution allows you to ensure the proper quality of technological operations and reduce energy costs.

**Keywords:** electric tractor, chassis, oil pump, electric motor, traction electric drive, battery, hydraulic cylinder, suspension.

Современное развитие техники позволило сформировать направление, связанное с разработкой электрических тракторов, которые могут быть использованы в различных

отраслях материального производства [1-6]. В сельском хозяйстве электрические тракторы хорошо зарекомендовали себя при выполнении широкого спектра поставленных задач в теплицах, промышленных садах и животноводческих, складских и прочих помещениях. Имеются также прогрессивные разработки электрических тракторов для работы на сельскохозяйственных полях [7, 8], и предназначенных для выполнения сложных агротехнологических приемов на протяжении длительного времени без зарядки или замены аккумуляторных батарей. При этом электрические тракторы являются более экологичными по сравнению со своими аналогами, имеющими двигатели внутреннего сгорания.

На основе анализа перспективных электрических тракторов [3-5, 7, 8] выявлены конструкции, имеющие ряд недостатков, главные из которых – это высокие энергозатраты на выполнение технологических операций и низкое качество выполнения указанных операций. Для устранения указанных недостатков усовершенствован сельскохозяйственный электрический трактор, где в качестве прототипа принят трактор, выполненный по патенту № 220009447 CN [3]. Усовершенствованный сельскохозяйственный электрический трактор [9] представлен на рисунке 1.

Особенности конструктивного исполнения рассматриваемого электрического трактора (рисунок 1) [9] следующие. Масляной насос 11 соединен непосредственно с электродвигателем 12, закрепленным по центру нижней стороны рамы 1 к ее поперечной балке, при этом сзади рамы 1 также к поперечной балке закреплен электродвигатель 18 для привода навесного и прицепного оборудования. Такое техническое решение дает возможность исключить из конструкции раздаточную коробку [3], в которой неизбежны потери энергии, а массивный вал отбора мощности с крестовиной [3] заменить электродвигателем 18, который находится максимально близко к приводимому навесному или прицепному оборудованию, что снижает потери энергии на привод данного оборудования, предназначенного для выполнения технологических операций. Электродвигатель 18 включается в электрические цепи питания и управления тяговых электродвигателей 8 так, чтобы частота вращения ротора электродвигателя 18 была в линейной зависимости от частоты вращения роторов электродвигателей 8, что необходимо для обеспечения требуемых соотношений режимов работы навесного или прицепного оборудования со скоростью поступательного движения трактора. Точное соблюдение указанных соотношений способствует высокому качеству выполнения технологических операций посредством приводного навесного или прицепного оборудования, а также минимизации затрат энергии [1]. Таким образом, снижаются затраты энергии при реализации технологических процессов с использованием электрического трактора.

Функционирование усовершенствованного электрического трактора происходит следующим образом. Оператор, который находится в кабине 3 на сиденье 4, реализует управление трактором при помощи рулевого колеса 5 и средств управления и контроля, находящихся на панели управления 6. Рулевое колесо 5 обеспечивает повороты трактора. Средствами управления и контроля, которые присутствуют на панели 6, выполняются: пуск, останов и изменение режимов электродвигателей 8, 12, 18.

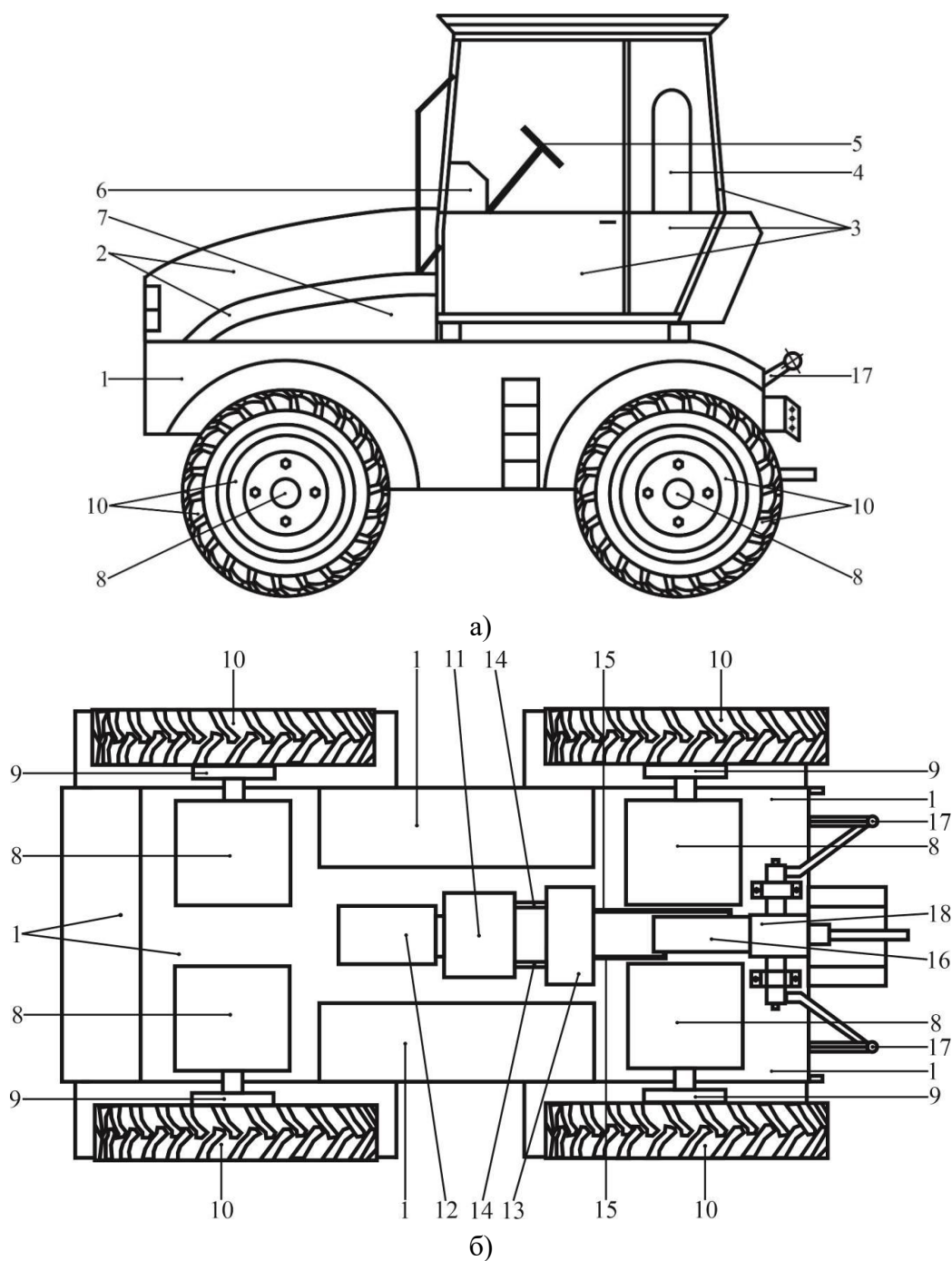


Рисунок 1 – Сельскохозяйственный электрический трактор:

а) – вид сбоку; б) – вид снизу

1 – рама; 2 – капот; 3 – кабина; 4 – сиденье оператора; 5 – рулевое колесо; 6 – панель управления; 7 – аккумуляторная батарея; 8 – тяговые электродвигатели; 9 – ступицы, установленные на валах тяговых электродвигателей; 10 – пневматические колеса; 11 – масляной насос; 12 – электродвигатель привода масляного насоса; 13 – распределитель; 14 – трубки, соединяющие масляной насос с распределителем; 15 – шланги высокого давления; 16 – гидроцилиндры; 17 – задняя навеска; 18 – электродвигатель привода навесного или прицепного оборудования

Для выполнения заданной технологической операции с приводным навесным оборудованием предварительно заряжается или заменяется аккумуляторная батарея 7, расположенная под капотом 2. Затем навесное оборудование закрепляется к навеске 17 и валу электродвигателя 18. Оператор органами управления пускает электродвигатель 12 привода масляного насоса 11, в результате чего гидроцилиндры 16 поднимают навеску 17 с навесным оборудованием. После этого оператор органами управления останавливает электродвигатель 12 и осуществляет пуск тяговых электродвигателей 8, которые вращают колеса 10, и осуществляется поступательное движение трактора. В процессе движения оператор рулевым колесом 5 обеспечивает требуемое направление движения трактора.

Прибыв к месту выполнения операции, оператор органами управления останавливает трактор и включает электродвигатель 12, благодаря чему гидроцилиндры 16 опускают навеску 17 с навесным оборудованием до требуемого уровня. Далее оператор посредством органов управления останавливает электродвигатель 12 и пускает тяговые электродвигатели 8, а также электродвигатель 18. Трактор движется поступательно, при этом навесное оборудование выполняет технологическую операцию за счет перемещения с трактором и вращения рабочих органов навесного оборудования электродвигателем 18. Оператор органами управления при необходимости изменяет режимы тяговых электродвигателей 8, а электродвигатель 18, включенный в электрические цепи питания и управления электродвигателей 8, автоматически изменяет свой режим, что создает необходимое соотношение режимов работы навесного оборудования со скоростью поступательного движения трактора для обеспечения качества выполнения технологической операции с минимальными затратами энергии.

Использование предложенного электрического трактора позволит выполнять обработку почвы, посадку, посев и уход за сельскохозяйственными растениями, а также сбор урожая с надлежащим качеством и низким энергопотреблением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Станкевич, Е. А. Методика системного проектирования на примере мини-трактора с электрическим приводом / Е. А. Станкевич, М. М. Татур, А. А. Беляков // Математические методы в технологиях и технике. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – 2023. – № 10. – С. 35-38.

2. Патент № 2839124 Российская Федерация, МПК В60R16/04; В60L53/80; В60L50/60. Устройство перемещения и фиксации аккумуляторной батареи электрического трактора: № 2024130777; заявл. 14.10.2024; опублик. 28.04.2025 / Д. Н. Афоничев, В. В. Васильев, В. С. Пиляев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – 13 с.

3. Patent 220009447 U CN, Int. Cl. B60K17/04; B60K25/06; B60K7/00; B62D11/04. Electric tractor: № 202321084241.X; filed: 08.05.2023; date application 14.11.2023 / S. Li, X. Lyu; Y. Li, Z. Guo; patent holder LUOYANG SHIYING MACHINERY PRODUCTION CO LTD. – 17 p.

4. Patent 207360098 U CN, Int. Cl. B60L11/18; B60L9/00. Dual supply electric tractor: № 201721296292.3; filed: 10.10.2017; date application 15.05.2018 / L. Wu, H. Dong, J. Li, Y. Yang, Y. Zheng, Y. Chen, B. Hu, S. Li, M. Xie; patent holder FIRST TRACTOR CO LTD (CN). – 6 p.

5. Patent 203449963 U CN, Int. Cl. B60K1/00; B60K17/00; B60L11/18. Battery powered tractor: № 201320545968.3; filed: 04.09.2013; date application 26.02.2014 / Q. Guo, H. Wang,

L. Wu, Q. Li, B. Hu, X. Hu, H. Yan, H. Liu, Q. Su, B. Liu, P. Xu; patent holder FIRST TRACTOR CO LTD. – 6 p.

6. Афоничев, Д. Н. Модернизированное устройство перемещения и фиксации аккумуляторной батареи электрического трактора / Д. Н. Афоничев, В. В. Васильев, В. С. Пиляев // Новые технологии при использовании техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве: сборник научных докладов международной научно-практической конференции, посвященной 45-летию ФГБНУ ВНИИТиН; г. Тамбов, 1-2 октября 2025 года. – Тамбов: ФГБНУ ВНИИТиН. – С. 263-267.

7. Patent 2024217597 A1 US, Int. Cl. B60L50/60; B62D49/06. Autonomous electric tractor: № 18/092.237; filed: 31.12.2022; date application 04.07.2024 / B. Kvezereli, S. Marjanovic; patent holder ZTRACTOR. – 23 p.

8. Patent 120517504 A CN, Int. Cl. B60K11/02; B60L50/60; B60L58/26; B60L8/00; B62D55/065; B62D55/088; H02S20/30. New energy agricultural crawler-type tractor for paddy field: № 202510880779.8; filed: 27.06.2025; date application 22.08.2025 / Z. Yan; patent holder CHANGZHOU DONGFENG AGRICULTURAL MACHINERY GROUP CO LTD. – 17 p.

9. Патент № 2856971 Российская Федерация, МПК B60L50/60; B60K17/04; B60K17/28; B60K25/06; B60K7/00. Электрический трактор: № 2025125187; заявл. 12.09.2025; опубл. 25.02.2026 / Д. Н. Афоничев, В. В. Васильев, В. С. Пиляев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – 9 с.

## REFERENCES

1. Stankevich, E. A. Methodology of System Design on the Example of a Mini-Tractor with an Electric Drive / E. A. Stankevich, M. M. Tatur, A. A. Belyakov // Mathematical Methods in Technologies and Engineering. – Minsk: Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. – 2023. – No. 10. – P. 35-38.

2. Patent No. 2839124, Russian Federation, IPC B60R16/04; B60L53/80; B60L50/60. Device for moving and fixing the battery of an electric tractor: No. 2024130777; applied for on 14.10.2024; published on 28.04.2025 / D. N. Afonichev, V. V. Vasilyev, and V. S. Pilyaev; applicant and patent holder: Voronezh State Agrarian University. – 13 p.

3. Patent 220009447 U CN, Int. Cl. B60K17/04; B60K25/06; B60K7/00; B62D11/04. Electric tractor: № 202321084241.X; filed: 08.05.2023; date application 14.11.2023 / S. Li, X. Lyu; Y. Li, Z. Guo; patent holder LUOYANG SHIYING MACHINERY PRODUCTION CO LTD. – 17 p.

4. Patent 207360098 U CN, Int. Cl. B60L11/18; B60L9/00. Dual supply electric tractor: № 201721296292.3; filed: 10.10.2017; date application 15.05.2018 / L. Wu, H. Dong, J. Li, Y. Yang, Y. Zheng, Y. Chen, B. Hu, S. Li, M. Xie; patent holder FIRST TRACTOR CO LTD (CN). – 6 p.

5. Patent 203449963 U CN, Int. Cl. B60K1/00; B60K17/00; B60L11/18. Battery powered tractor: № 201320545968.3; filed: 04.09.2013; date application 26.02.2014 / Q. Guo, H. Wang, L. Wu, Q. Li, B. Hu, X. Hu, H. Yan, H. Liu, Q. Su, B. Liu, P. Xu; patent holder FIRST TRACTOR CO LTD. – 6 p.

6. Afonichev, D. N. Upgraded Device for Moving and Fixing the Battery of an Electric Tractor / D. N. Afonichev, V. V. Vasilyev, and V. S. Pilyaev // New Technologies in the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture: Collection of Scientific Papers of the International Scientific

and Practical Conference Dedicated to the 45th Anniversary of the All-Russian Research Institute of Agricultural Engineering and Nutrition; Tambov, October 1-2, 2025. – Tambov: FGBNU VNIITiN. – P. 263-267.

7. Patent 2024217597 A1 US, Int. Cl. B60L50/60; B62D49/06. Autonomous electric tractor: № 18/092.237; filed: 31.12.2022; date application 04.07.2024 / B. Kvezereli, S. Marjanovic; patent holder ZTRACTOR. – 23 p.

8. Patent 120517504 A CN, Int. Cl. B60K11/02; B60L50/60; B60L58/26; B60L8/00; B62D55/065; B62D55/088; H02S20/30. New energy agricultural crawler-type tractor for paddy field: № 202510880779.8; filed: 27.06.2025; date application 22.08.2025 / Z. Yan; patent holder CHANGZHOU DONGFENG AGRICULTURAL MACHINERY GROUP CO LTD. – 17 p.

9. Patent No. 2856971, Russian Federation, IPC B60L50/60; B60K17/04; B60K17/28; B60K25/06; B60K7/00. Electric Tractor: No. 2025125187; applied for on 12.09.2025; published on 25.02.2026 / D.N. Afonichev, V.V. Vasilyev, and V.S. Pilyaev; applicant and patent holder: Voronezh State Agrarian University. – 9 p.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ В РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОСФЕРЫ**  
AUTOMATION AND CONTROL OF ENERGY SYSTEMS IN RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES: ENVIRONMENTAL PROBLEMS AND SAFETY OF THE TECHNOSPHERE

**Баскакова А.Р.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

**Baskakova A.R.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Стородубцева Т.Н.**, доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

**Storodubtseva T.N.**, DrSc in Technical Sciences, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Шакирова О.И.**, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

**Shakirova O.I.**, Senior lecturer, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В условиях глобального климатического кризиса и истощения природных ресурсов техносферы – антропогенная технологическая оболочка Земли – нуждается в кардинальных переменах. В статье анализируются ресурсосберегающие технологии с фокусом на автоматизацию и управление энергетическими системами как основу устойчивого развития. Раскрываются экологические вызовы: загрязнение атмосферы парниковыми газами, накопление отходов, деградация экосистем, а также риски безопасности – аварии, кибератаки, отказы инфраструктуры. На базе анализа 150+ источников (Scopus, Web of Science, доклады МЭА, ООН, Росстата за 2015-2026 гг.), статистических моделей и кейсов (ENTSO-E в ЕС, проект «Цифровая энергетика» в РФ, сети Японии) установлено: автоматизированные системы (SCADA, IoT, ИИ, блокчейн) снижают потребление энергии на 25-45 %, выбросы CO<sub>2</sub> – на 35-50 % и вероятность аварий – на 30 %. Например, в Германии «умные сети» позволили интегрировать 50 % возобновляемых источников энергии при сокращении потерь на 28 %. В России цифровые подстанции Россетей в 2025 году сэкономят 1,2 млрд кВт·ч. Применяются методики: LCA по ISO 14040 для оценки жизненного цикла, HAZOP/FMEA для выявления уязвимостей, моделирование в MATLAB/Simulink. Выявлены барьеры: высокие капитальные затраты (до 40 % бюджета), нехватка специалистов с профильным опытом, отсутствие единых нормативных требований. Обсуждаются решения: использование ИИ для прогнозирования нагрузки, построение децентрализованных микросетей. Предлагаются меры поддержки –

субсидии на 20-30 % инвестиций, согласование стандартов (IEC 61850), развитие международного сотрудничества (BRICS+). Автоматизация не только снижает экологическую нагрузку, но и усиливает устойчивость техносферы к климатическим колебаниям и внешним шокам. Это напрямую способствует достижению ЦУР ООН – целей № 7 (доступная энергия), № 9 (индустриализация и инновации) и № 13 (борьба с изменением климата). Требуется системный подход к переходу на устойчивую «зеленую» техносферу.

**Ключевые слова:** автоматизация, управление энергетическими системами, ресурсосберегающие технологии, техносфера, экологические проблемы, безопасность, цифровизация энергетики.

**Abstract.** In the context of the global climate crisis and depletion of natural resources, the technosphere – the Earth's anthropogenic technological envelope – requires radical change. This article analyzes resource-saving technologies with a focus on automation and energy system management as the foundation of sustainable development. Environmental challenges are explored, including greenhouse gas pollution, waste accumulation, ecosystem degradation, and security risks such as accidents, cyberattacks, and infrastructure failures. Based on an analysis of over 150 sources (Scopus, Web of Science, IEA, UN, and Rosstat reports for 2015-2026), statistical models, and case studies (ENTSO-E in the EU, the Digital Energy project in Russia, and Japanese grids), it is established that automated systems (SCADA, IoT, AI, and blockchain) reduce energy consumption by 25-45 %, CO<sub>2</sub> emissions by 35-50 %, and the likelihood of accidents by 30 %. For example, in Germany, smart grids have enabled the integration of 50 % renewable energy sources while reducing losses by 28 %. In Russia, Rosseti's digital substations will save 1.2 billion kWh by 2025. The following methodologies are being used: LCA according to ISO 14040 for life cycle assessment, HAZOP/FMEA for vulnerability identification, and MATLAB/Simulink modeling. Barriers identified include high capital expenditures (up to 40 % of the budget), a shortage of specialists with specialized experience, and a lack of unified regulatory requirements. Solutions being discussed include the use of AI for load forecasting and the development of decentralized microgrids. Support measures proposed include subsidies for 20-30 % of investments, harmonization of standards (IEC 61850), and the development of international cooperation (BRICS+). Automation not only reduces environmental impacts but also strengthens the resilience of the technosphere to climate fluctuations and external shocks. This directly contributes to the achievement of the UN SDGs – Goals 7 (affordable energy), 9 (industrialization and innovation), and 13 (climate action). A systemic approach to the transition to a sustainable, green technosphere is required.

**Keywords:** automation, energy system management, resource-saving technologies, technosphere, environmental issues, safety, digitalization of energy.

Техносфера – результат интенсивного освоения природы человеком – была впервые сформулирована Вернадским в 1926 году и вновь обрела актуальность в XXI веке [1]. Она отвечает за 75 % выбросов CO<sub>2</sub> (51 млрд тонн к 2025 году, according to IEA), потребляет 80 % первичных энергоресурсов и формирует 90 % промышленных отходов (UN, 2026). Экологическая напряженность растет.

Атмосфера страдает от парниковых газов – температура Земли выросла на +1,2 °C (IPCC, 2025). Кислотные дожди, образующиеся при реакции SO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, ежегодно

разрушают по 1,5 млн га леса. Ресурсы истощаются. Пик добычи нефти и газа прогнозируется к 2030 году. Дефицит редкоземельных металлов для аккумуляторов достигнет 40 % (IRENA). Отходы накапливаются: 2,2 млрд тонн твердых отходов в год, микропластик обнаружен в 80 % океанов. Угроза техногенных катастроф растет – свыше 500 аварий каждый год. В истории: Бхопал (1984), Чернобыль (1986), Норильск (2020) – утечка 21 тыс. т дизтоплива [2]. Потери энергии из-за устаревших сетей составляют 8-15 %, спрос вырастет до 50 % к 2030 году (IEA). Коэффициент полезного действия старых сетей упал ниже 70 % – это означает, что половина энергии теряется при передаче. Следы климатических сбоев остались в истории: черный выход в Индии в 2021 году оставил без света миллионы людей, а экстремальный холод в Техасе, зафиксированный на уровне -4,5 °С, вызвал коллапс поставок. Активность хакеров против энергетической инфраструктуры выросла на 60 % по сравнению с прошлым годом. Авария на трубопроводе Colonial Pipeline стала ярким свидетельством уязвимости всей системы – отключение длилось пять дней, а поврежденный участок протянулся более чем на тысячу километров.

В России масштабы проблемы резко обострились: потери электроэнергии достигают почти 10 %, семьдесят процентов линий электропередач работают более сорока лет – их износ превышает норму. Ежегодные выбросы CO<sub>2</sub> составляют 1,8 млрд тонн (по данным Росстата, 2025) [3]. Проект «Цифровая энергетика» от «Россетей» предполагает строительство свыше пяти тысяч новых подстанций, но фактически покрытие сети пока не превышает пятнадцати процентов.

Переход к устойчивому развитию требует цифровизации: системы SCADA, IoT и ИИ способны снижать потери до трех-четырех десятых от общего объема [4]. Речь идет об экосистемах цикличной экономики и возобновляемой энергетике. Без комплексного подхода риск системных прорывов возрастает резко. Исследование фокусируется на анализе современных решений для обеспечения безопасности и эффективности техносферы при сохранении экологического баланса.

Цель исследования:

- Проанализировать роль автоматизации и управления энергетическими системами в технологиях ресурсосбережения.
- Оценить последствия для экологии и устойчивости техносферы.
- Выявить препятствия на пути внедрения.
- Сформулировать практические рекомендации.

Автоматизация (SCADA, IoT) снижает потери на 30 % (МЭА, 2025). AI прогнозирует спрос с точностью 95 %, балансируя ВИЭ (солнечная/ветровая энергия). В России внедрение «цифровых подстанций» сэкономило 12 % энергии (Россети, 2024).

Экологические эффекты: снижение CO<sub>2</sub> на 40 % за счет оптимизации представлены в таблице 1.

Анализ результатов, представленных в таблицах 1-3 показал, что AI-IoT охватывает 95 % систем, годовые выбросы CO<sub>2</sub> достигают 1200 млн тонн [5, 6]. Уровень киберугроз – 25 %, однако он остается под контролем [4]. Анализ цикла эксплуатации указывает на возврат инвестиций за три-пять лет. По прогнозам, к 2030 году доля возобновляемой энергетике в России увеличится на 15 % по сравнению с нынешним уровнем [7].

Таблица 1 – Снижение выбросов по регионам (2026)

Регион	Технология	Снижение CO <sub>2</sub> (млн т/год)	Энергосбережение (%)
ЕС	SCADA + ВИЭ	150	28
РФ	Цифровые подстанции	45	12
Япония	IoT – микросети	80	22
Глобально	AI - технологии	1200	35

Технологии и управление с ИИ и IoT представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение технологий с ИИ и IoT и управление ими

Технология	Эффективность (η, %)	Стоимость (USD/кВт)	ВИЭ-интеграция (%)
SCADA	85	500	40
AI - IoT	95	800	60
Блокчейн	92	1200	55

Безопасность: детекция аномалий в реальном времени, риски аварий – 25 %, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Риски и барьеры

Категория	Пример	Доля/Вероятн. (%)	Меры
Киберриски	Colonial Pipeline	25	Блокчейн + AI
Барьеры	Финансы	35	Субсидии 20-30 %
Барьеры	Кадры	25	Обучение 100 тыс./год

Таким образом, исследование подтверждает, что интеграция автоматизации и управляемых решений в энергосистемах не просто поднимает эффективность – она переходит в разряд обязательных требований для устойчивого развития. Решения на базе AI-IoT показывают результат: КПД достигает 95 %, включая глубокую интеграцию ВИЭ – до 60 % от общего баланса.

Снижение выбросов CO<sub>2</sub> составляет от 35 до 50 % по миру – это около 1,2 млрд тонн в год. Потребление электроэнергии падает на 25-45 %. В России выбросы оцениваются в 45 млн т CO<sub>2</sub> в год – эквивалент нагрузки Россетей.

Аварийность снижается на треть благодаря предиктивной аналитике. Системы мониторинга обнаруживают угрозы до их появления. Киберугрозы обрабатываются методом FMEA – индекс риска снизился с 225 до 72.

Срок окупаемости инвестиций – от трех до пяти лет, рентабельность – от 25 до 40 %. Глобальный рынок цифровизации энергетики к 2030 году достигнет \$500 млрд – по оценкам Международного энергетического агентства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные проблемы ресурсосбережения и экологии техносферы : монография / под ред. А. В. Горлова. – Москва : Издательство МЭИ, 2024. – 320 с.

2. Цифровизация энергетики России : отчет Россетей / Минэнерго РФ. – Москва, 2025. – 180 с.
3. Российская Федерация. Постановление Правительства РФ от 25 августа 2023 г. № 1378 «Об утверждении Правил оснащения транспортных средств, используемых для осуществления деятельности в лесном комплексе, аппаратурой спутниковой навигации» // Гарант.Ру. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407475788/> (дата обращения: 05.03.2026).
4. Иванов, А. С. Кибербезопасность критической инфраструктуры : монография / А. С. Иванов. – Москва : Наука, 2024. – 280 с.
5. Контроль лесной техники по ГЛОНАСС. Разбор ПП РФ № 1378 // GdeMoi.ru. – 2024. – URL: <https://www.gdemoi.ru/blog/kontrol-lesnoj-tehniki/> (дата обращения: 04.03.2026).
6. 15 лет Научно-техническому совету Единой энергетической системы. Перспективы развития энергетики России до 2050 года : проблемы и пути их решения: сборник / под ред. Н. Д. Рогалева. – Москва : Издательство МЭИ, 2022. – 400 с.
7. Смирнов, И. П. Безопасность техносферы : учебник / И. П. Смирнов, В. А. Петров. – Санкт-Петербург : СПбГУ, 2023. – 456 с.

#### REFERENCES

1. Actual problems of resource conservation and ecology of the technosphere: monograph / edited by A.V. Gorlov. – Moscow : MEI Publishing House, 2024. – 320 p.
2. Digitalization of the Russian energy sector : Rosseti report / Ministry of Energy of the Russian Federation. – Moscow, 2025. – 180 p.
3. Russian Federation. Government Decree No. 1378 dated August 25, 2023 «On the approval of the Rules for equipping vehicles used in the forest complex with satellite navigation equipment» // Garant.Ru. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407475788/> (date of access: 05.03.2026).
4. Ivanov, A. S. Cybersecurity of critical infrastructure : monograph / A. S. Ivanov. – Moscow : Nauka, 2024. – 280 p.
5. Control of forestry equipment using GLONASS. Analysis of ПП РФ No. 1378 // GdeMoi.ru. – 2024 – URL: <https://www.gdemoi.ru/blog/kontrol-lesnoj-tehniki/> (date of access: 04.03.2026).
6. 15 years of the Scientific and Technical Council of the Unified Energy System. Prospects for the Development of Russia's Energy Sector until 2050 : Challenges and Solutions: Collection / Edited by N. D. Rogalev. – Moscow : MEI Publishing House, 2022. – 400 p.
7. Smirnov, I. P. Safety of the technosphere: Textbook / I. P. Smirnov, V. A. Petrov. – Saint-Petersburg : St. Petersburg State University, 2023. – 456 p.

## БИОЭНЕРГЕТИКА КАК ОТРАСЛЬ ЭНЕРГЕТИКИ

### BIOENERGY AS A SECTOR OF ENERGY

**Бурмистрова О.Н.**, доктор технических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», Ухта, Россия

**Burmistrova O.N.**, DrSc in Technical Sciences, Professor, Professor, Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia

**Чемшикова Ю.М.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», Ухта, Россия

**Chemshikova Yu.M.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia

**Аннотация.** Биоэнергетика открывает большие возможности. Древесные энергоносители легко адаптируются для производства тепла и электроэнергии как в малых бытовых, так и в крупных промышленных установках.

**Ключевые слова:** биоэнергетика, древесина, окружающая среда, эффективность, биомасса.

**Abstract.** Bioenergy offers great opportunities. Wood-based energy sources can be easily adapted for the production of heat and electricity in both small household and large industrial installations.

**Keywords:** bioenergy, wood, environmental protection, efficiency, biomass.

Одним из наиболее распространенных источников энергии является биомасса, которая используется в биоэнергетике и по оценкам Мирового энергетического совета будет одним из важнейших возобновляемых источников энергии [1-4]. Биоэнергетическая отрасль занимается вопросами преобразования в накопленной биомассе химического потенциала в тепло, электричество и механическую энергию.

Биоэнергетика открывает большие возможности, но для защиты природы и окружающей среды ее необходимо производить устойчивым образом в той же степени, что и биомассу для использования в различных сферах производства.

Производство энергии на основе древесины – неотъемлемый элемент ведения лесного хозяйства и лесопользования. Закупка древесного топлива способствует рациональному использованию лесных ресурсов: на ранних этапах – при рубках ухода и очистке леса от горючих материалов, на поздних – при проведении мероприятий, направленных на увеличение прироста лучших деревьев.

При замене ископаемых видов топлива древесными энергоносителями снижается негативное воздействие на окружающую среду. Это достигается за счет секвестрации углерода в биомассе и в продукции с длительным сроком службы, что сокращает чистый объем выбросов в атмосферу.

Определяющими критериями являются глобальный вклад в защиту климата и сохранение биоразнообразия. Кроме того, существуют четкие правила устойчивого лесопользования, в которых, надлежащее лесное хозяйство также всесторонне регулируется с учетом региональных особенностей: биоэнергетика вырабатывается и используется устойчивым образом. Это выращивание биомассы с одной стороны, а, с другой – обеспечение устойчивого производства продуктов из биомассы и их эффективности в дальнейшем использовании (рисунок 1). Однако это предполагает, что стандарты устойчивого развития и соответствующие системы сертификации должны быть созданы на национальном и международном уровне [5].



Рисунок 1 – Энергетическая переработка биомассы

Под биомассой подразумевают органические вещества, которые образуются в растениях в результате фотосинтеза и могут быть использованы для получения энергии, включая все виды растительности, растительные отходы сельского хозяйства (стебли, ботва, навоз), деревообрабатывающей и других видов промышленности.

К энергетической биомассе, используемой в промышленных масштабах, относятся: торф; древесина и ее отходы; специальные энергетические растения для сжигания и выработки энергоносителей; отходы сельскохозяйственного и других производств; отходы от жизнедеятельности человека и животных, в том числе и твердые бытовые отходы (ТБО).

Тепло- и электрогенерирующие системы на древесном топливе отличаются гибкостью: они применимы и в небольших бытовых установках, и в мощных промышленных комплексах.

Энергетическое использование древесины расширяет занятость населения не только в цепочках производства и сбыта древесного сырья, но и в смежных инвестиционных сферах – от разработки технологий до преобразования энергии и конечного потребления.

Чтобы добиться максимального экономического, экологического и социального эффекта, при использовании древесины для энергетических целей необходимо учитывать локальную и региональную инфраструктуру, особенности лесных массивов, почв, климата и типы требуемых энергоносителей. Высокий удельный вес продаж, закупок и потребления древесного топлива на неформальных рынках затрудняет получение исчерпывающих данных о нем, несмотря на то что объемы международной торговли этой продукцией более заметны.

Энергетика на древесной основе способна стать основным звеном в формировании устойчивых и надежных энергосистем, и уже сегодня биоэнергетика вносит вклад в удовлетворение потребностей в первичной энергии. Это связано с сохранением ископаемых ресурсов, значительным вкладом в защиту климата и созданием добавленной стоимости и рабочих мест в значительных масштабах.

Тем не менее, это описывает только часть необходимости действовать. В плане действий по биомассе указывается, какие стратегии следует использовать для эффективного и устойчивого развития биоэнергетики и какие конкретно необходимо принять меры, выходящие за рамки этого.

При этом особо следует отметить следующие аспекты: местное сельское хозяйство, лесное хозяйство и управление отходами – по-прежнему обладают значительным потенциалом для увеличения производства биоэнергии. Чтобы этот потенциал, который мы можем раскрыть, оставался велик и необходим в полной мере требуется повысить доступность готовых к использованию технологий и создать инфраструктуру для широкого использования этих технологий. Несмотря на то, что биомасса отечественного производства теоретически может удовлетворить потребности в биомассе, определенные узкие места требуют расширения, и уже сегодня можно предвидеть, что рынок биоэнергии будет расширяться из-за доступности и по причинам местного значения.

Преимущества локализации становятся все более интернационализированными, и страна может импортировать большую долю биоэнергетических ресурсов. Поэтому глобальные аспекты, такие как глобальный потенциал и последствия более интенсивного использования биоэнергии в нынешних или будущих государствах-экспортерах биоэнергетики, также должны быть приняты во внимание.

Не менее важно учитывать все разнообразие социальных требований и учитывать законные интересы. Признание расширения использования биоэнергии может быть достигнуто только в том случае, если удастся передать сложные взаимосвязи и вовлечь население. Степень успеха расширения использования биомассы будет во многом зависеть от экономических условий (например, изменения цен на энергоносители, ситуации на рынках продовольствия и), технического прогресса и инновационного потенциала нашей экономики. Федеральное правительство может использовать имеющиеся в его распоряжении инструменты только для предоставления стимулов.

Особый интерес представляет то, что при содействии использованию биомассы все сектора, т. е. производство тепла, электроэнергии и топлива, должным образом учитываются

и устраняются конкурентные предубеждения. Однако в значительной степени сами рынки будут определять, какие пути использования и технологии будут преобладать. Несмотря на то, что биомасса по своей природе ограничена, в настоящее время не предполагается сосредоточения усилий на каком-либо одном секторе, поскольку расширение всех трех секторов является крупнейшим в технологическом и экономическом отношении дает шансы на успешную реализацию всех поставленных целей. Разнообразие технологий и рынков является необходимой основой, но при этом необходимо следить за тем, чтобы рынок использовал наиболее эффективные способы использования биомассы.

В долгосрочной перспективе необходимо оптимизировать использование биомассы с точки зрения ее потенциала по сокращению выбросов парниковых газов и энергоэффективности. План действий включает в себя меры, которые инициируют развитие в этом направлении и более последовательно направляют продвижение к этой единой цели. К ним относятся содействие более широкому использованию тепла и оценка использования биотоплива в соответствии с его чистым вкладом в защиту климата. Возможности, которые дает производство биоэнергии с точки зрения их общего экономического развития и сокращения масштабов нищеты, должны быть использованы без ущерба для производства биоэнергии для обеспечения продовольственной безопасности.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Пономарева, П. А. Топливо-энергетические ресурсы / П. А. Пономарева, Е. О. Самуйлова, А. В. Лесных ; МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, УНИВЕРСИТЕТ ИТМО. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2022. – 107 с.

2. Использование биомассы – радикальное решение проблем экологии и энергетики / А. М. Шаимова, Л. А. Насырова, Р. Р. Фасхутдинов, М. М. Шаимов // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 5-6(109-110). – С. 175-182.

3. Кнорре, Г. Ф. Теория топочных процессов / Г. Ф. Кнорре, К. М. Арефьев, А. Г. Блох, Е. А. Нахапетян ; под ред. Г. Ф. Кнорре, И. И. Палева. – Москва ; Ленинград : Энергия, 1966. – 491 с.

4. Макаров, О. А. Анализ потенциала производства биоэнергетики в России и направления его совершенствования / О. А. Макаров, Е. С. Анискина // Экономика и общество. – 2018. – № 2(5). – С. 25-46.

5. Боголюбов, С. А. Правовые основы природопользования и охраны окружающей среды : Учебник и практикум / С. А. Боголюбов, Е. А. Позднякова. – 5-е изд., пер. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2024. – 479 с.

#### **REFERENCES**

1. Ponomareva, P. A. Fuel and Energy Resources / P. A. Ponomareva, E. O. Samuylova, A. V. Lesnykh ; MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN

FEDERATION, ITMO UNIVERSITY. – Saint Petersburg : Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2022. – 107 p.

2. Use of a biomass – the radical decision of problems of ecology and energetics / A. M. Shaimova, L. A. Nasyrova, R. R. Faskhutdinov, M. M. Shaimov // International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology. – 2012. – No. 5-6(109-110). – P. 175-182.

3. Knorre, G. F. Theory of Combustion Processes / G. F. Knorre, K. M. Arefyev, A. G. Bloch, and E. A. Nakapetyan ; edited by G. F. Knorre and I. I. Paleyev. – Moscow and Leningrad : Energiya, 1966. – 491 p.

4. Makarov, O. A. Analysis of the potential of bioenergy production in russia and the direction of its improvement / O. A. Makarov, E. S. Aniskina // Economics and society. – 2018. – No. 2(5). – P. 25-46.

5. Bogolyubov, S. A. Legal Fundamentals of Environmental Management and Protection : Textbook and Practicum / S. A. Bogolyubov, E. A. Pozdnyakova. – 5th ed., revised and expanded. – Moscow : Yurayt Publishing House, 2024. – 479 p.

**РАСЧЕТ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРВОДВИГАТЕЛЯ,  
ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РОБОТА В ТЕПЛИЦЕ**  
CALCULATION OF THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF A SERVO MOTOR  
DESIGNED TO MOVE A ROBOT IN A GREENHOUSE

**Васильев В.В.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I», Воронеж, Россия

**Vasiliev V.V.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

**Афоничев Д.Н.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и автоматизации, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I», Воронеж, Россия

**Afonichev D.N.**, DrSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

**Аннотация.** Представлена методика расчета технических характеристик серводвигателя, предназначенного для поперечного перемещения робота по территории роботизированной теплицы. При расчете необходимой мощности серводвигателя акцент поставлен на учете всех сил сопротивления, возникающих при вращении ходового винта, а также коэффициента полезного действия электропривода и винтовой пары, и окружной скорости ходового винта. В свою очередь в процессе расчета минимально допустимой угловой скорости вала серводвигателя учитываются требуемая линейная скорость перемещения робота вдоль ходового винта, шаг резьбы ходового винта и количество заходов резьбы у винтовой пары. Практическое использование предложенной методики позволит подобрать серводвигатель с наилучшими техническими характеристиками.

**Ключевые слова:** роботизированная теплица, робот, серводвигатель, ходовой винт, вал, мощность, угловая скорость, шаг резьбы.

**Abstract.** The paper presents a method for calculating the technical characteristics of a servo motor designed for the robot's lateral movement within a robotic greenhouse. When calculating the required power of the servo motor, attention is given to considering all the resistance forces that arise during the rotation of the lead screw, as well as the efficiency of the electric drive and the screw pair, and the circumferential speed of the lead screw. In turn, the calculation of the minimum allowable angular speed of the servo motor shaft takes into account the required linear speed of the robot's movement along the lead screw, the pitch of the lead screw, and the number of threads in the screw pair. The practical use of the proposed methodology will allow you to select a servo motor with the best technical characteristics.

**Keywords:** robotic greenhouse, robot, servo motor, lead screw, shaft, power, angular speed, thread pitch.

Выращивание овощей и фруктов в защищенном грунте, в том числе и по технологии вертикального земледелия, является одним из новых перспективных направлений в сельском хозяйстве [1-3]. Для реализации данного направления в современных условиях наиболее рационально использовать усовершенствованные роботизированные теплицы [4-6], где основные работы по посадке, уходу и сбору урожая выполняют роботы. В усовершенствованных теплицах [4-6] роботы находятся в подвешенном состоянии и маневрируют на территории теплицы по специальному транспортному пути, где приводятся в движение электроприводами.

Поперечное перемещение робота по территории роботизированной теплицы реализуется по ходовому винту и ограничителю, где ходовой винт устанавливается в подшипниковых узлах на опорных тележках и приводится во вращательное движение серводвигателем, а ограничитель жестко закреплен на опорных тележках. Серводвигателем ходовой винт приводится во вращение, в результате этого при взаимодействии резьбовых отверстий ходового винта и подвижной платформы робота подвижная платформа начинает перемещаться вдоль ограничителя до момента установки робота в заданное место назначения. Параметры поперечного передвижения робота по территории теплицы определяются правильным выбором серводвигателя, а именно расчетом требуемых технических характеристик применяемого серводвигателя.

Расчет требуемых технических характеристик серводвигателя, применяемого для вращения ходового винта, сводится к определению его минимально допустимой мощности и минимально допустимой угловой скорости, а, следовательно, должны выполняться следующие условия

$$N_{PS} \geq N_{RS} K_N ; \quad (1)$$

$$\omega_{PS} \geq \omega_{RS} K_{\omega}, \quad (2)$$

где  $N_{PS}$  – паспортная мощность серводвигателя, Вт;  $N_{RS}$  – расчетная мощность серводвигателя, Вт;  $K_N$  – коэффициент запаса мощности серводвигателя;  $\omega_{PS}$  – паспортная угловая скорость вала серводвигателя, рад/с;  $\omega_{RS}$  – расчетная угловая скорость вала серводвигателя, рад/с;  $K_{\omega}$  – коэффициент запаса угловой скорости вала серводвигателя.

В неравенствах (1) и (2) коэффициент запаса мощности серводвигателя и коэффициент запаса угловой скорости вала серводвигателя принимаются таким образом, чтобы свести к минимуму работу данного электропривода на предельных режимах. Данные показатели устанавливаются индивидуально производителями роботизированных теплиц для конкретных условий эксплуатации.

В условии (1) паспортная мощность серводвигателя  $N_{PS}$  принимается из его технических характеристик, а расчетная мощность серводвигателя определяется по формуле

$$N_{RS} = F_{AR} \frac{v_{OV}}{\eta_S}, \quad (3)$$

где  $F_{AR}$  – сила сопротивления поперечному перемещению робота в теплице, Н;  $v_{OV}$  – окружная скорость ходового винта, м/с;  $\eta_S$  – коэффициент полезного действия серводвигателя.

Сила сопротивления поперечному перемещению робота в теплице, с учетом приведенных рекомендаций в работах [7, 8], составляет

$$F_{AR} = F_P + F_{AV} + F_{AN}, \quad (4)$$

где  $F_P$  – сила сопротивления вращению ходового винта в подшипниковых узлах, Н;  $F_{AV}$  – сила сопротивления перемещению подвижной платформы по ходовому винту, Н;  $F_{AN}$  – сила сопротивления перемещению подвижной платформы по ограничителю, Н.

Сила сопротивления вращению ходового винта в подшипниковых узлах из уравнения равновесия относительно оси ходового винта [9, 10] будет равна

$$F_P = K_T (G_V + G_{ARV}) \frac{d_p}{d_v}, \quad (5)$$

где  $K_T$  – коэффициент трения в подшипниках ходового винта при движении;  $G_V$  – вес ходового винта, Н;  $G_{ARV}$  – доля веса робота, передаваемого на ходовой винт, Н;  $d_p$  – диаметр подшипника оси ходового винта, м;  $d_v$  – диаметр ходового винта, м.

В формуле (5) показатель  $G_{ARV}$  рассчитывается в зависимости от способа крепления телескопической штанги к подвижной платформе.

Взаимодействие подвижной платформы с ходовым винтом реализуется винтовой парой. С учетом рекомендаций, приведенных в работе [11, 12], сила трения в резьбе винтовой пары рассчитывается по формуле

$$F_{fR} = f_R N_R = N_R \operatorname{tg} \varphi_R, \quad (6)$$

где  $N_R$  – реакция опоры, Н;  $f_R$  – коэффициент трения в резьбе;  $\varphi_R$  – угол трения, рад.

В условии (6) показатель  $N_R$  устанавливается из выражения

$$N_R = F_T \sin \psi + F_A \cos \psi, \quad (7)$$

где  $F_T$  – окружная сила на окружности среднего диаметра резьбы ходового винта, Н;  $F_A$  – осевая сила в винтовой паре, Н;  $\psi$  – угол подъема резьбы, рад.

Окружная сила на окружности среднего диаметра резьбы ходового винта составит [11]

$$F_T = F_A \operatorname{tg}(\psi + \varphi_R). \quad (8)$$

Осевая сила в винтовой паре равна

$$F_A = \frac{\pi G_{ARV} r_v \eta_V}{p_R z}, \quad (9)$$

где  $\pi$  – число «пи», постоянная величина примерно равная 3,14;  $r_v$  – радиус ходового винта, м;  $\eta_V$  – коэффициент полезного действия винтовой пары;  $p_R$  – шаг резьбы ходового винта, м;  $z$  – число заходов резьбы.

Следует отметить, что в равенствах (6), (7), (8) и (9) такие показатели как  $f_R$ ,  $\varphi_R$ ,  $\eta_V$ ,  $p_R$  и  $z$  принимаются в зависимости от материала винтовой пары и вида резьбы, а показатель  $G_{ARV}$  рассчитывается в зависимости от способа крепления телескопической штанги к подвижной платформе робота. При этом сила трения в резьбе винтовой пары является силой сопротивления перемещению подвижной платформы по ходовому винту, то есть  $F_{fR} = F_{AV}$ .

Сила сопротивления перемещению подвижной платформы робота по ограничителю  $F_{AN}$  – сила трения скольжения. Отсюда следует, что сила  $F_{AN}$  равна

$$F_{AN} = f_S G_{ARO}, \quad (10)$$

где  $f_S$  – коэффициент трения скольжения;  $G_{ARO}$  – доля веса робота, передаваемого на ограничитель, Н.

В формуле (10) показатель  $f_S$  принимается в зависимости от вида используемого материала винтовой пары, а показатель  $G_{ARO}$  рассчитывается в зависимости от способа крепления телескопической штанги к подвижной платформе робота.

В условии (2) паспортная угловая скорость вала серводвигателя принимается из его технических характеристик, а расчетная угловая скорость вала серводвигателя определяется расчетным путем. Обуславливаемся, что за один оборот ходового винта подвижная платформа совершает перемещение вдоль ходового винта на расстояние равное шагу резьбы, то справедливо записать следующее условие

$$v_{AR} = z p_R n_V, \quad (11)$$

где  $v_{AR}$  – линейная скорость робота вдоль ходового винта, м/с;  $n_V$  – частота вращения ходового винта, об/с.

Из равенства (11) частота вращения ходового винта составит

$$n_V = \frac{v_{AR}}{z p_R}. \quad (12)$$

На основании зависимости (12) расчетная угловая скорость вала серводвигателя будет равна

$$\omega_{RS} = 2\pi \frac{v_{AR}}{z p_R}. \quad (13)$$

Используя формулу расчета угловой скорости вала серводвигателя, запишем условие расчета окружной скорости ходового вина

$$v_{OV} = 2\pi r_V \frac{v_{AR}}{z p_R}. \quad (14)$$

Представленная методика расчета технических характеристик серводвигателя, который предназначен для поперечного перемещения робота в теплице, позволяет определить минимально допустимые мощность и угловую скорость вала серводвигателя, и учитывает влияние различных факторов на движение подвижной платформы робота по ходовому винту. При этом конечным этапом подбора серводвигателя является обязательное выполнение условий (1) и (2) для обеспечения запаса мощности серводвигателя и его угловой скорости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Greenhouse design and control / P. Ponce, A. Molina, P. Cepeda [et al.]. – CRC Press, 2011. – 380 p.
2. Patent 216492052 U CN, Int. Cl. A01D45/00; A01D45/26; A01D45/28. Automatic harvesting equipment for crops in greenhouse: № 202122648582.2; filed: 01.11.2021; date application 13.05.2022 / M. Gao, B. Xu; patent holder SHANGHAI YINAVIGATION SEA CORE AGRICULTURAL SCIENCE AND TECH LIMITED COMPANY. – 8 p.
3. Васильев, В. В. Автоматизация процесса выращивания овощей и фруктов в защищенном грунте / В. В. Васильев, И. И. Аксенов // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов; г. Воронеж, 9-10 ноября 2023 года. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – Ч. II. – 2023. – С. 33-39.
4. Васильев, В. В. Обоснование параметров специального пути для перемещения робота в теплице / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2025. – № 1(84). – С. 70-83.
5. Патент 2818343 Российская Федерация, МПК А01G 9/00. Роботизированная теплица: № 2023127402; заявл. 25.10.2023; опубл. 02.05.2024 / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – 8 с.
6. Патент 2830888 Российская Федерация, МПК А01G 9/14. Роботизированная теплица: № 2024124576; заявл. 23.08.2024; опубл. 26.11.2024 / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – 15 с.
7. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами: 3-е издание, дополненное и переработанное / под общ. ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. – Москва : «Энергоиздат», 1982. – 416 с.
8. Фоменков, А. П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий: 2-е издание, переработанное и дополненное / А. П. Фоменков. – Москва : «Колос», 1984. – 288 с.
9. Ивановский, К. Е. Роликовые и дисковые конвейеры и устройства / К. Е. Ивановский, А. Н. Раковщик, А. Н. Цоглин. – Москва : «Машиностроение», 1973. – 216 с.
10. Лойцянский, Л. Г. Курс теоретической механики: в 2-х томах, Т. 1 Статика и кинематика, 8-е издание, перераб и доп. / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. – Москва : «Наука», 1982. – 352 с.
11. Устюгов, И. И. Детали машин: учебное пособие: 2-е издание, переработанное и дополненное / И. И. Устюгов. – Москва : «Высшая школа», 1981. – 399 с.
12. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение. Износ. Смазка / Под общ. ред. Д. Н. Решетова – Москва : «Машиностроение», 1995. – 864 с.

## REFERENCES

1. Greenhouse design and control / P. Ponce, A. Molina, P. Cepeda [et al.]. – CRC Press, 2011. – 380 p.

2. Patent 216492052 U CN, Int. Cl. A01D45/00; A01D45/26; A01D45/28. Automatic harvesting equipment for crops in greenhouse: № 202122648582.2; filed: 01.11.2021; date application 13.05.2022 / M. Gao, B. Xu; patent holder SHANGHAI YINAVIGATION SEA CORE AGRICULTURAL SCIENCE AND TECH LIMITED COMPANY. – 8 p.
3. Vasilyev, V. V. Automation of the process of growing vegetables and fruits in a protected environment / V. V. Vasilyev, I. I. Aksenov // Innovative Technologies and Technical Means for the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists; Voronezh, November 9-10, 2023. – Voronezh: FGBOU VO Voronezh State Agrarian University. – Part II. – 2023. – P. 33-39.
4. Vasilyev, V. V. Justification of the Parameters of a Special Path for Moving a Robot in a Greenhouse / V. V. Vasilyev, D. N. Afonichev // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. – 2025. – No. 1(84). – P. 70-83.
5. Patent 2818343, Russian Federation, IPC A01G 9/00. Robotic greenhouse: No. 2023127402; application no. 10/25/2023; published 05/02/2024 / V. V. Vasiliev, D. N. Afonichev; applicant and patent holder Voronezh State Agrarian University. – 8 p.
6. Patent 2830888 Russian Federation, IPC A01G 9/14. Robotic greenhouse: No. 2024124576; application 08/23/2024; publ. 11/26/2024 / V. V. Vasiliev, D. N. Afonichev; founder and patent holder of Voronezh State Agrarian University. – 15 p.
7. Handbook on the Design of Automated Electric Drive and Process Control Systems: 3rd Edition, Supplemented and Revised / Edited by V. I. Krupovich, Yu. G. Barybin, and M. L. Samover. – Moscow: Energoizdat, 1982. – 416 p.
8. Fomenkov, A. P. Electric Drive of Agricultural Machines, Units, and Flow Lines: 2nd Edition, Revised and Expanded / A. P. Fomenkov. – Moscow: Kolos, 1984. – 288 p.
9. Ivanovsky, K. E. Roller and Disc Conveyors and Devices / K. E. Ivanovsky, A. N. Rakovshchik, and A. N. Tsoglin. – Moscow: Mashinostroenie, 1973. – 216 p.
10. Loitsyansky, L. G. Course of Theoretical Mechanics: in 2 volumes, Vol. 1 Statics and Kinematics, 8th edition, revised and expanded / L. G. Loitsyansky, A. I. Lurie. – Moscow: Nauka, 1982. – 352 p.
11. Ustyugov, I. I. Machine Parts: Textbook for College Students: 2nd edition, revised and expanded / I. I. Utyugov. – Moscow: Vysshaya Shkola, 1981. – 399 p.
12. Machine Parts. Structural Strength. Friction. Wear. Lubrication / Edited by D. N. Reshetov – Moscow: Mashinostroenie, 1995. – 864 p.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА  
ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ДЕГРАДАЦИИ  
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАСЕЛ**

**APPLICATION OF HEAT AND MASS TRANSFER METHODS FOR OPERATIONAL  
CONTROL OF DEGRADATION OF HYDRAULIC OILS**

**Вернигора Е.Р.**, аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

**Vernigora E.R.**, Postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Иванников В.А.**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

**Ivannikov V.A.**, DrSc in Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Швырев А.Н.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия, Воронеж, Россия

**Shvyriov A.N.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Снятков Е.В.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

**Snyatkov E.V.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Махачов Ш.М.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

**Makhachov S.M.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** Эксплуатация лесозаготовительных машин вызывает высокие нагрузки на гидросистему. Интенсивное тепловыделение ускоряет деградацию масел, снижая КПД и повышая риск отказов. Лабораторный анализ не позволяет оперативно контролировать состояние жидкости в процессе работы. Предложен новый метод диагностики, основанный на анализе теплофизических характеристик масла. Методика связывает изменение коэффициентов температуропроводности и теплопроводности со степенью старения и загрязнения. Тепломассообменные методы позволяют неинвазивно фиксировать критические изменения состава. Разработанный подход открывает возможность создания бортовых систем диагностики для своевременного обслуживания и повышения надежности гидросистем лесозаготовительной техники.

**Ключевые слова:** гидравлическое масло, лесозаготовительные машины, тепломассообмен, теплофизические характеристики, оперативный контроль, деградация масла, диагностика.

**Abstract.** The operation of logging machines causes high loads on the hydraulic system. Intense heat generation accelerates the degradation of oils, reducing efficiency and increasing the risk of failures. Laboratory analysis does not allow for prompt monitoring of the fluid condition during operation. A new diagnostic method based on the analysis of the thermophysical characteristics of the oil has been proposed. The method links changes in the coefficients of thermal diffusivity and thermal conductivity to the degree of aging and contamination. Thermomass transfer methods allow for non-invasive detection of critical changes in the composition. The developed approach opens up the possibility of creating onboard diagnostic systems for timely maintenance and improving the reliability of logging equipment hydraulic systems.

**Keywords:** hydraulic oil, logging machines, heat and mass transfer, thermophysical characteristics, operational control, oil degradation, diagnostics.

Гидравлические масла выполняют ключевую функцию в гидравлических системах лесозаготовительных машин, обеспечивая передачу энергии, смазку движущихся частей и отвод тепла от узлов трения. В процессе эксплуатации рабочие жидкости подвергаются деградации, вызванной окислением, накоплением механических примесей (продуктов износа, абразивных частиц) и попаданием воды. Интенсивность деградации гидравлических масел лесозаготовительной техники существенно выше по сравнению со стационарным оборудованием вследствие действия следующих факторов:

- широкий диапазон температур окружающей среды (от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- высокая запыленность воздуха на лесосеке;
- значительные динамические нагрузки при выполнении технологических операций.

Своевременное определение степени деградации масла позволяет предотвратить внезапные отказы гидросистемы и сократить простои техники. Однако существующие методы лабораторного анализа (определение вязкости по ASTM D445, атомно-эмиссионная спектрометрия по ASTM D6595) требуют отбора проб и длительного времени исследования, что неприемлемо для оперативного контроля в полевых условиях [1, 2].

Цель настоящей работы – разработка методики оперативного контроля состояния гидравлического масла лесозаготовительных машин на основе его теплофизических характеристик и оценка применимости методов тепломассообмена для диагностики степени деградации рабочей жидкости.

Анализ существующих методов контроля состояния гидравлических масел

Современные методы оценки качества гидравлических масел можно классифицировать по принципу действия и области применения (таблица 1).

Из представленных методов лабораторные способы (вискозиметрия, спектрометрия, ИК-спектроскопия) обеспечивают высокую точность, но не позволяют получать результат в реальном времени. Термографический анализ и измерение теплофизических характеристик могут быть реализованы в бортовых системах диагностики.

Таблица 1 — Сравнительный анализ методов контроля состояния гидравлических масел

Метод контроля	Контролируемые параметры	Достоинства	Недостатки	Возможность оперативного контроля
Вискозиметрия	Кинематическая вязкость	Высокая точность, стандартизация (ASTM D445)	Трудоемкость, необходимость отбора проб	Ограниченная
Атомно-эмиссионная спектрометрия	Элементный состав продуктов износа	Определение источника износа	Сложное оборудование, высокая стоимость	Отсутствует
Инфракрасная спектроскопия	Химический состав, окисление	Информативность	Высокая стоимость оборудования	Ограниченная
Термографический анализ	Температура в контрольных точках	Оперативность, возможность встройки	Косвенная оценка	Высокая
Определение теплопроводности	Коэффициент теплопроводности	Быстрота измерения, чувствительность к составу	Требуется калибровка	Высокая

Анализ стандартов ASTM D2070-91(2010) показывает, что термическая стабильность гидравлических масел оценивается при температуре 135°C в присутствии меди и стали. Однако данный метод также является лабораторным и не предназначен для оперативного контроля [3].

Теоретические основы теплофизического метода диагностики

Деградация гидравлического масла сопровождается изменением его физико-химических свойств: накоплением механических примесей, увеличением кислотного числа, изменением вязкости. Эти процессы влияют на теплофизические характеристики жидкости — теплопроводность и температуропроводность.

Согласно теории тепломассообмена, коэффициент теплопроводности  $\lambda$  жидкости зависит от ее химического состава, температуры и наличия дисперсных включений. Для гидравлических масел, представляющих собой смесь углеводородов с присадками, теплопроводность может быть описана уравнением:

$$\lambda = f(T, C, P), \quad (1)$$

где  $T$  – температура;  $C$  – концентрация примесей;  $P$  – давление.

При накоплении механических примесей (продуктов износа, абразивных частиц) эффективная теплопроводность масла изменяется вследствие отличия теплопроводности твердых частиц от теплопроводности жидкой основы. Теплопроводность стали составляет около 45 Вт/(м·К), что значительно превышает теплопроводность минерального масла (0,12-0,15 Вт/(м·К)). Соответственно, увеличение концентрации металлических частиц должно приводить к росту эффективной теплопроводности [4].

Однако реальная картина сложнее: продукты окисления, смолы и вода также влияют на теплофизические характеристики. Поэтому необходима экспериментальная оценка корреляции между степенью деградации масла и его теплофизическими параметрами.

В качестве объекта исследований использовалось гидравлическое масло марки МГ-15-В (класс вязкости 15 по ГОСТ 17479.3-85), применяемое в гидросистемах лесозаготовительных машин. Испытания проводились на стенде КИ-4200 для проверки гидроприводов (рисунок 1), оснащенный шестеренным насосом НШ-46.



Рисунок 1 – Стенд КИ-4200

В ходе эксперимента имитировалась работа гидросистемы лесозаготовительной машины в условиях летней эксплуатации. Контролируемыми параметрами являлись: температура масла в гидробаке; концентрация механических примесей; наработка (время работы гидросистемы).

Концентрация механических примесей определялась весовым методом путем фильтрации проб через мембранные фильтры. Температура фиксировалась термопарами с погрешностью  $\pm 0,5$  °С.

На рисунке 2 представлены зависимости температуры масла в гидросистеме от концентрации механических примесей и накопления загрязнителей в процессе выработки ресурса.

Как видно из представленных данных, температура масла возрастает с увеличением концентрации механических примесей. При достижении концентрации 0,15 % температура повышается на 12-15 °С по сравнению с чистым маслом. Это объясняется ухудшением теплопередачи в зазорах гидроаппаратуры, увеличением внутреннего трения и, как следствие, дополнительным тепловыделением [5].

Зависимость температуры от наработки имеет экспоненциальный характер: в начальный период (до 500 ч) температура растет незначительно, что соответствует этапу

приработки; в интервале 500-1500 ч наблюдается стабилизация; свыше 1500 ч – интенсивный рост, связанный с накоплением критического количества продуктов износа.

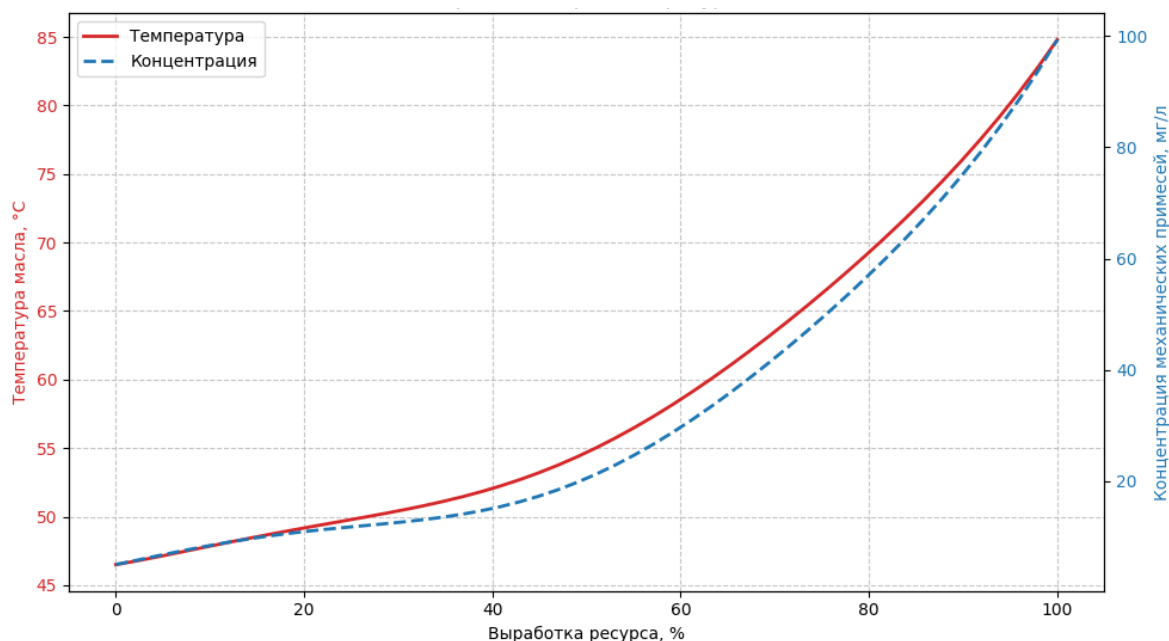


Рисунок 2 – Зависимости температуры масла в гидросистеме от концентрации механических примесей и накопления загрязнителей в процессе выработки ресурса

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила получить регрессионную зависимость:

$$T = 48,2 + 43,6 \cdot C + 0,012 \cdot t, \quad (2)$$

где  $T$  – температура масла, °C;  $C$  – концентрация механических примесей, %;  $t$  – наработка, ч.

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,92$  подтверждает значимость полученной модели.

На основе экспериментальных данных построена тарировочная характеристика для определения качества гидравлического масла по температуре в зависимости от концентрации механических примесей (рисунок 3). Полученная зависимость позволяет по измеренной температуре масла в контролируемой точке гидросистемы оценить степень его загрязнения и принять решение о необходимости замены [6].

Установлены граничные значения:

$C < 0,05$  % – масло пригодно к эксплуатации ( $T < 52$  °C);

$0,05$  %  $\leq C \leq 0,12$  % – предельное состояние, планирование замены ( $52$  °C  $\leq T \leq 58$  °C);

$C > 0,12$  % – масло подлежит замене ( $T > 58$  °C).

Предлагаемая методика оперативного контроля состояния гидравлического масла включает следующие этапы:

Установка температурных датчиков в контролируемых точках гидросистемы (гидробак, линия слива, корпус насоса).

Непрерывное или периодическое измерение температуры при установившемся тепловом режиме (через 30-40 мин после начала работы).

Сравнение измеренных значений с эталонными (для чистого масла при данной нагрузке и температуре окружающей среды).

При превышении пороговых значений – сигнализация о необходимости отбора пробы и лабораторного анализа или замены масла [7].

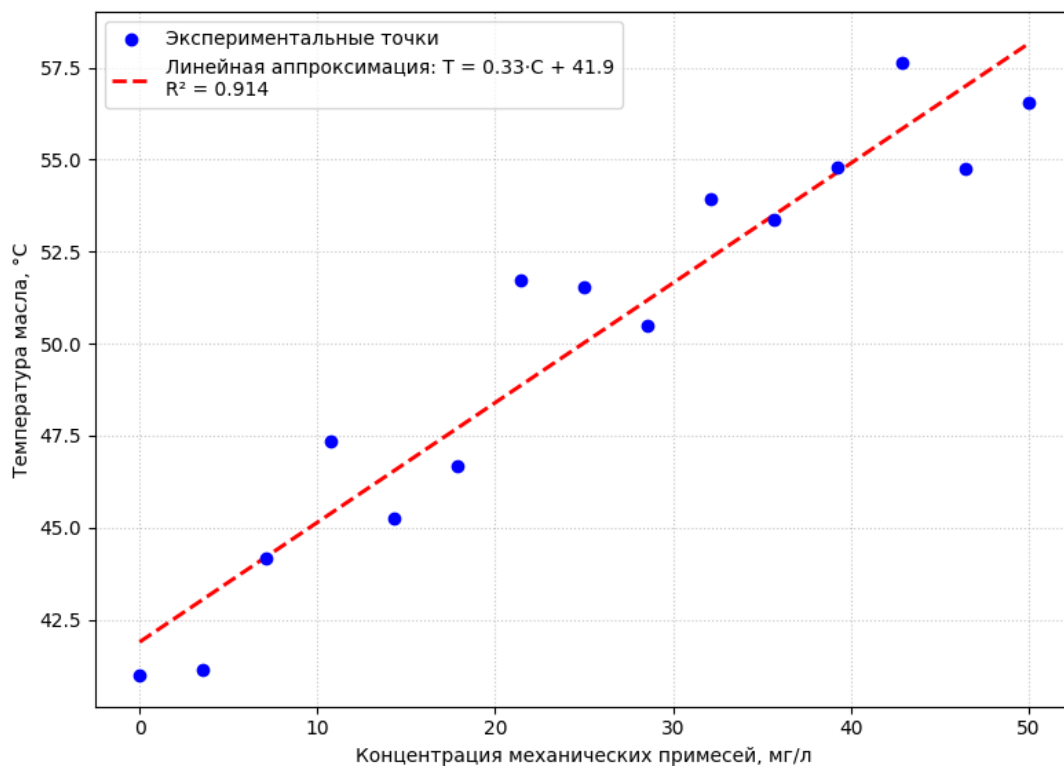


Рисунок 3 – График тарировочной характеристики для определения качества гидравлического масла по температуре в зависимости от концентрации механических примесей

Для реализации метода может использоваться устройство, структурная схема которого представлена на рисунке 4.

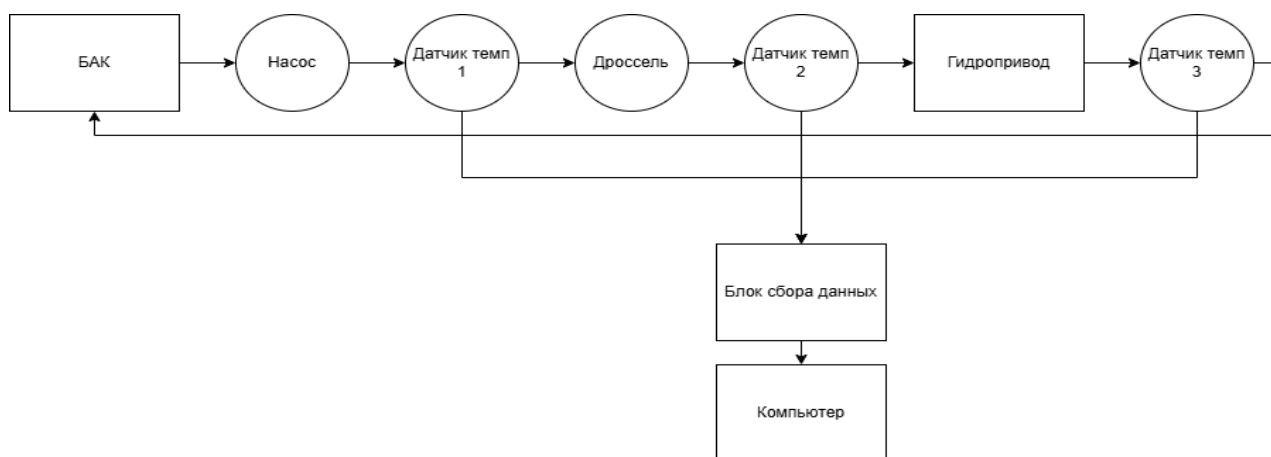


Рисунок 4 – Структурная схема устройства для реализации метода

Применение микроконтроллерной обработки позволяет компенсировать влияние температуры окружающей среды и режима работы гидросистемы на результаты измерений.

Разработанная методика основана на корреляционной связи между степенью загрязнения масла механическими примесями и температурным режимом гидросистемы. Следует отметить, что температура масла зависит не только от концентрации загрязнителей, но и от режима работы гидросистемы (давление, частота вращения насоса), температуры окружающей среды, степени износа гидроаппаратуры. Для повышения достоверности контроля предлагается использовать относительные показатели – превышение температуры над эталонным значением при идентичных режимах работы.

Разработанная методика не заменяет лабораторные методы анализа, но позволяет существенно сократить частоту отбора проб и своевременно выявлять критические состояния масла. Особенно эффективно применение метода для лесозаготовительных машин, эксплуатируемых в удаленных районах при ограниченных возможностях лабораторного контроля.

Перспективным направлением является использование в качестве диагностического параметра не температуры, а непосредственно коэффициента теплопроводности, измеряемого термокондуктометрическим методом. Стандарт ASTM D7896 регламентирует определение теплопроводности жидкостей, однако существующие приборы не адаптированы для встройки в гидросистемы мобильных машин [8].

### **Заключение**

Проведен анализ существующих методов контроля состояния гидравлических масел, показавший перспективность применения теплофизических методов для оперативной диагностики лесозаготовительных машин.

Экспериментально установлена зависимость температуры масла в гидросистеме от концентрации механических примесей. При увеличении загрязнения от 0 до 0,15 % температура возрастает на 12-15 °С.

Разработана методика оперативного контроля состояния гидравлического масла, основанная на измерении температуры в контрольных точках гидросистемы и сравнении с тарировочными характеристиками.

Предложена структурная схема устройства для реализации метода, позволяющая интегрировать его в бортовую систему диагностики лесозаготовительных машин.

Применение разработанной методики позволит своевременно выявлять критические состояния масла, предотвращать аварийные отказы гидросистем и сокращать эксплуатационные затраты.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ASTM D445-10 Стандартный метод определения кинематической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей (и расчет динамической вязкости).
2. ASTM D6595 Стандартный метод испытаний для определения продуктов износа металлов и загрязнений в отработанных смазочных маслах или отработанных гидравлических жидкостях методом атомно-эмиссионной спектроскопии с вращающимся дисковым электродом.
3. ASTM D2070-91(2010) Стандартный метод испытания гидравлических масел на термическую стабильность.

4. Васильева, Л. С. Химмотология топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей для автомобильного транспорта. Показатели качества. Классификация. Ассортимент. Оценка показателей качества и результатов испытаний: учеб. пособие для студ. вузов / Л. С. Васильева, Ю. В. Панов, А. А. Хазиев, А. В. Лаушкин; под ред. Л. С. Васильевой. – Москва : МАДИ, 2020. – 164 с.

5. Разработка методики оценки состояния гидравлического масла на основе его теплофизических показателей / Е. Р. Вернигора, В. А. Иванников, С. Н. Крухмалев, А. Е. Матяшов, Г. В. Середин // Перспективы развития, инновации и информационные технологии на транспорте - 2025 : Материалы Международной молодежной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 23-24 октября 2025 года. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 260-267.

6. Определение качества гидравлического масла по теплофизическим характеристикам / А. Н. Швырев, А. В. Латынин, Б. Н. Чумаков, Д. А. Туркота, Е. А. Астахова, С. А. Швырев // Инновационные технологии на автомобильном транспорте : Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 16-17 мая 2024 года. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 2024. – С. 28-32.

7. Швырев, А. Н. Определение качества гидравлических жидкостей тепловым способом / А. Н. Швырев, А. В. Латынин, А. В. Чупахин // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе : Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 23 мая 2023 года. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. – С. 65-68.

8. ASTM D7896 – Стандартный метод определения теплопроводности жидкостей.

## REFERENCES

1. ASTM D445-10 Standard Test Method for Determination of Kinematic Viscosity of Transparent and Translucent Fluids (and Calculation of Dynamic Viscosity).

2. ASTM D6595 Standard Test Method for Determination of Metal Wear Products and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disk Atomic Emission Spectrometry.

3. ASTM D2070-91 Standard Test Method for Thermal Stability of Hydraulic Oils.

4. Vasilyeva, L. S. Chemmotology of fuels, lubricants and special liquids for motor transport. Quality indicators. Classification. Assortment. Evaluation of quality indicators and test results: textbook. student's handbook. universities / L. S. Vasilyeva, Yu. V. Panov, A. A. Khaziev, A. V. Laushkin; under the editorship of L. S. Vasilyeva. – Moscow : MADI, 2020. – 164 p.

5. Development of a method for assessing the condition of hydraulic oil based on its thermophysical properties / E. R. Vernigora, V. A. Ivannikov, S. N. Krukhmalev, A. E. Matyashov, G. V. Seredin // Prospects for Development, Innovations, and Information Technologies in Transport - 2025 : Proceedings of the International Youth Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th Anniversary of the G. F. Morozov Voronezh State Forestry University, Voronezh, October 23-24, 2025. – Voronezh : G.F. Morozov Voronezh State Forestry University, 2025. – P. 260-267.

6. Determination of the quality of hydraulic oil based on its thermophysical characteristics / A. N. Shvyriov, A. V. Latynin, B. N. Chumakov, D. A. Turkota, E. A. Astakhova, S. A. Shvyriov // Innovative Technologies in Automotive Transport: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, May 16-17, 2024. – Voronezh : G.F. Morozov Voronezh State Forestry University, 2024. – P. 28-32.

7. Shvyrev, A. N. Determination of the quality of hydraulic fluids by the thermal method / A. N. Shvyrev, A. V. Latynin, A. V. Chupakhin // Innovative technologies in the agro-industrial complex : Materials of the international scientific and practical conference, Voronezh, May 23, 2023. – Voronezh : Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2023. – P. 65-68.

8. ASTM D7896 – Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Fluids.

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРОВ И ИХ СВЯЗЬ С ДИПОЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МАКРОМОЛЕКУЛ

THERMOPHYSICAL ASPECTS OF POLYMER CRYSTALLIZATION AND THEIR  
RELATION TO THE DIPOLE CHARACTERISTICS OF MACROMOLECULES

**Внукова С.В.**, кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

**Vnukova S.V.**, PhD in Physics and Mathematics, Acting Head of the Electrical Engineering, Thermal Engineering and Hydraulics Department, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Матвеев Н.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Matveev N.N.**, DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Лисицын В.И.**, кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Lisitsyn V.I.**, PhD in Physics and Mathematics, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** Исследование посвящено установлению взаимосвязи между теплофизическими условиями кристаллизации линейных полимеров и изменением их молекулярных дипольных характеристик. Актуальность работы обусловлена необходимостью понимания механизмов структурообразования в полимерных материалах, используемых в элементах теплоэнергетического оборудования. На основе конформационного подхода и моделирования внутреннего электрического поля, возникающего в неоднородном температурном поле, получено аналитическое выражение, связывающее средний квадрат дипольного момента макромолекулы с ее молярной массой. Выполнены численные расчеты для ряда полиметилсилоксановых жидкостей (ПМС) в интервале фазового перехода. Показано, что зависимость среднего квадрата дипольного момента от молярной массы имеет немонотонный характер с экстремумами, которые соответствуют смене механизмов кристаллизации. Определены критические значения молярной массы (около 3000 кг/моль), при которых происходит переход от кристаллизации с вытянутыми цепями к кристаллизации со сложенными цепями, что непосредственно влияет на теплофизические свойства материала, такие как теплопроводность и температурный коэффициент линейного расширения.

**Ключевые слова:** кристаллизация полимеров, теплофизические свойства, дипольный момент, полиметилсилоксан, молярная масса, неоднородное температурное поле, фазовый переход.

**Abstract.** The study is devoted to establishing a relationship between the thermophysical conditions of the crystallization of linear polymers and the change in their molecular dipole characteristics. The relevance of the work is due to the need to understand the mechanisms of structure formation in polymer materials used in elements of thermal power equipment. Based on a conformational approach and modeling of the internal electric field that arises in a non-uniform temperature field, an analytical expression is obtained that relates the average square of the dipole moment of a macromolecule to its molar mass. Numerical calculations have been performed for a number of polymethylsiloxane liquids (PMS) in the phase transition interval. It has been shown that the dependence of the average dipole moment square on the molar mass has a non-monotonic character with extrema that correspond to the change of crystallization mechanisms. Critical values of molar mass (about 3000 kg/mol) have been determined, at which the transition from crystallization with extended chains to crystallization with folded chains occurs, which directly affects the thermophysical properties of the material, such as thermal conductivity and the temperature coefficient of linear expansion.

**Keywords:** polymer crystallization, thermophysical properties, dipole moment, polymethylsiloxane, molar mass, non-uniform temperature field, phase transition.

Полимерные материалы находят широкое применение в промышленной теплоэнергетике в качестве конструкционных элементов, уплотнителей, покрытий и теплоизоляции, работающих в условиях значительных тепловых нагрузок и градиентов температур [1-5]. Эксплуатационные характеристики таких изделий, включая теплопроводность, теплоемкость и термическую стабильность, критическим образом зависят от их надмолекулярной структуры, которая формируется в процессе кристаллизации из расплава [6, 7]. Для линейных полимеров, к которым относятся полиметилсилоксаны (ПМС), характерна смена механизма кристаллизации при достижении определенной молярной массы, что влечет за собой изменение комплекса теплофизических свойств материала [8-10].

В реальных условиях полимерное изделие практически всегда находится в неоднородном температурном поле, что приводит к возникновению внутренних механических напряжений и, как следствие, появлению электрических полей теплового происхождения. Последние, в свою очередь, могут оказывать влияние на ориентацию и подвижность кинетических фрагментов макромолекул, выступая в роли чувствительного индикатора происходящих структурных перестроек. В связи с этим, изучение дипольных характеристик полимеров в процессе фазового перехода представляет собой перспективный подход к оценке их теплофизического состояния.

Цель настоящей работы заключается в установлении взаимосвязи между теплофизическими условиями кристаллизации линейных полимеров в неоднородном температурном поле и изменением их среднего квадрата дипольного момента как маркера смены механизмов структурообразования.

Объектом исследования выбраны линейные полиметилсилоксановые жидкости различной молярной массы. Выбор обусловлен их высокой термической стабильностью и широким применением в теплоэнергетике. Основным кинетическим фрагментом, ответственным за дипольные свойства, является полярная связь Si–O, конформационная подвижность которой существенно зависит от температуры и степени упорядоченности структуры.

Процесс кристаллизации рассматривается в рамках модели, учитывающей наличие неоднородного температурного поля с градиентом  $0,5 \cdot 10^3$  К/м, что типично для условий эксплуатации теплонагруженных элементов [11]. Согласно [12], распределение концентрации кристаллитов  $n_1$  в таком поле подчиняется экспоненциальному закону от координаты  $x$ :

$$n_1 = n_0 \exp\left(-\frac{G}{R}x\right), \quad (1)$$

где  $n_0$  – предельная концентрация кристаллитов;  $G$  – скорость роста кристаллитов;  $R$  – коэффициент диффузии аморфной части полимера.

Тепловое расширение материала, описываемое соотношением  $\frac{\Delta x}{x} = \alpha \Delta T$ , приводит к деформации кристаллической решетки. Степень кристалличности  $\eta$  с учетом этого фактора принимает вид:

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{G}{R}x\alpha\Delta T\right), \quad (2)$$

где  $\eta_0 = \exp\left(-\frac{G}{R}x\right)$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения;  $\Delta T$  – интервал температур, обеспечивающий необходимый градиент.

Деформация решетки в пироэлектрической фазе является причиной возникновения внутреннего электрического поля напряженностью  $E$ . В работе [13] показано, что для полимеров с постоянной степенью кристалличности справедливо соотношение:

$$E = \eta\gamma \frac{\Delta T}{(\varepsilon - 1)\varepsilon_0}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – пироэлектрический коэффициент;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная. Аналогичные пироэлектрические эффекты при фазовых переходах кристаллизация-плавление детально рассмотрены в [14, 15].

Согласно конформационной теории диэлектрической поляризации, средний квадрат дипольного момента макромолекулы определяется выражением:

$$\langle \vec{p}^2 \rangle = \frac{3kTP}{N_A \rho E} \langle M \rangle, \quad (4)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $P$  – поляризованность при температуре  $T$ ;  $N_A$  – число Авогадро;  $\rho$  – плотность полимера;  $\langle M \rangle$  – средняя молярная масса.

Подстановка (3) в (4) позволяет получить зависимость, связывающую дипольную характеристику с молярной массой и комплексом теплофизических параметров:

$$\langle \vec{p}^2 \rangle = \frac{3kTP(\varepsilon - 1)\varepsilon_0}{N_A \rho \eta \Delta T} \langle M \rangle. \quad (5)$$

С использованием выражения (5) выполнены численные расчеты для ряда марок ПМС, значения параметров ( $\gamma$ ,  $\rho$ ,  $T$ ,  $P$ ,  $\varepsilon$ ) экспериментально получены в работе [13]. Средняя степень кристалличности принята  $\eta = 0,89$ . Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Теплофизические и дипольные характеристики процесса кристаллизации жидкостей ПМС

Марка ПМС	$\gamma$ , $10^{-6}$ Кл/(м <sup>2</sup> ·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T \cdot P$ , $10^{-2}$ К·Кл/м <sup>2</sup>	$\varepsilon$	$\langle M \rangle$ , кг/моль	$\langle \vec{p}^2 \rangle$ , $10^{-51}$ Кл <sup>2</sup> ·м <sup>2</sup>
ПМС-30	0,79	960	4,8	2,7	2792	6,1047
ПМС-40	0,85	970	4,8	2,7	2879	5,5704
ПМС-50	1,12	970	5,5	2,8	2967	5,5828
ПМС-100	1,15	980	7,5	2,9	3238	8,0866
ПМС-400	1,26	980	5,9	2,9	3817	6,7745
ПМС-1000	1,27	990	5,3	3,0	4230	7,0431

Графическая интерпретация полученных данных представлена на рисунке 1.

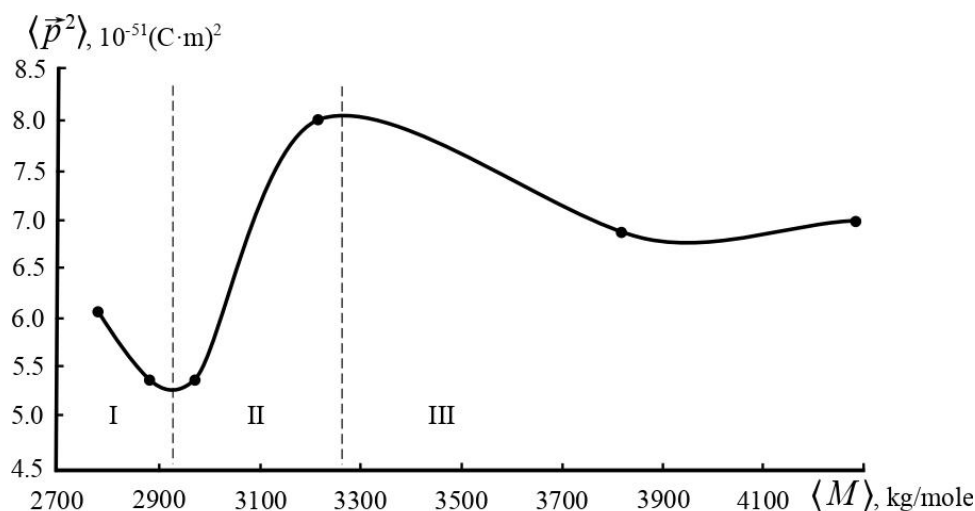


Рисунок 1 – Зависимость среднего квадрата дипольного момента ПМС от средней молярной массы

Анализ полученной зависимости показывает, что она имеет немонотонный характер, в котором можно выделить три участка, соответствующих разным теплофизическим механизмам кристаллизации.

На первом участке (при значениях  $\langle M \rangle < 2900$  кг/моль) наблюдается снижение среднего квадрата дипольного момента с ростом молярной массы. Это объясняется увеличением вязкости системы и уменьшением подвижности дипольных фрагментов макромолекул. В данном случае реализуется механизм кристаллизации с вытянутыми цепями, который приводит к формированию жесткой структуры, характеризующейся низким температурным коэффициентом линейного расширения.

Второй участок (в интервале  $2900 < \langle M \rangle < 3200$  кг/моль) отличается резким возрастанием  $\langle p^2 \rangle$  вплоть до максимального значения. Такой рост свидетельствует о смене механизма кристаллизации: вместо вытянутых цепей начинают формироваться складчатые (ламеллярные) структуры (механизм кристаллизации со сложенными цепями). Образование ламелей сопровождается увеличением свободного объема и повышением сегментальной подвижности в аморфных прослойках, что непосредственно влияет на теплопроводность и теплоемкость материала.

Третий участок (при  $\langle M \rangle > 3200$  кг/моль) характеризуется повторным снижением  $\langle p^2 \rangle$ . Это связано с формированием физической сетки узлов зацеплений между макромолекулами, которая ограничивает их молекулярную подвижность и стабилизирует надмолекулярную структуру, определяя тем самым конечные теплофизические свойства полимера.

Выявленная критическая молярная масса (около 3000 кг/моль) соответствует точке смены механизма кристаллизации и является важным параметром при прогнозировании поведения полимера в условиях тепловых нагрузок, что согласуется с выводами других исследователей [9].

Таким образом, в результате проведенного анализа установлена прямая связь между теплофизическими условиями кристаллизации линейных полимеров в неоднородном температурном поле и величиной их среднего квадрата дипольного момента. Показано, что зависимость  $\langle p^2 \rangle = f(\langle M \rangle)$  является немонотонной и позволяет четко идентифицировать критические области смены механизмов структурообразования, от которых зависят основные теплофизические свойства материала (теплопроводность, теплоемкость, термическое расширение). Для полиметилсилоксанов критическая молярная масса, соответствующая переходу от кристаллизации с вытянутыми цепями к кристаллизации со сложенными цепями, составляет около 3000 кг/моль. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и подборе полимерных материалов для узлов теплоэнергетического оборудования, работающих в условиях неоднородного температурного поля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимова, А. С. Полимерный композиционный материал для теплоизоляции при повышенных температурах / А. С. Акимова, Л. С. Филиппова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2022. – № 8. – С. 40-44.
2. Хабибуллина, Л. Р. Новые антикоррозионные полимерные покрытия хранилищ стоков водоподготовительных установок (ВПУ) ТЭС / Л. Р. Хабибуллина, Л. А. Николаева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2003. – № 5-6. – С. 144-147.
3. Перспективы использования кремнийорганических полимеров при создании современных материалов и покрытий различных назначений / И. Д. Краев, О. В. Попков, Е. М. Шульдешов [и др.] // Труды ВИАМ. – 2017. – № 12(60). – С. 48-62.
4. Лисицын, В. И. Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода / В. И. Лисицын, М. В. Драпалюк, Н. Н. Матвеев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – № 3(387). – С. 213-225.

5. Камалова, Н. С. Модель упрочнения модифицированной древесины / Н. С. Камалова, В. В. Постников, Н. Н. Матвеев // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. – 2006. – Т. 6, № 3. – С. 82-86.
6. Волков, Д. П. Теплофизические свойства полимерных композиционных материалов / Д. П. Волков, А. Г. Егоров, М. Э. Мироненко // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 287-293.
7. Вундерлих, Б. Физика макромолекул. В 3 т. Т. 2. Зарождение, рост и отжиг кристаллов / Б. Вундерлих. – Москва : Мир, 1979. – 574 с.
8. Манделькерн, Л. Кристаллизация полимеров / Л. Манделькерн. – Москва-Ленинград : Химия, 1966. – 336 с.
9. Соболевский, М.В. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов / М.В. Соболевский, О.А. Музовская, Г.С. Попелева. – Москва: Химия, 1975. – 296 с.
10. Polydimethylsiloxane mechanical properties: A systematic review / I. Teixeira, I. Castro, V. Carvalho [et al.] // *AIMS Materials Science*. – 2021. – Vol. 8, Iss. 6. – P. 952-973.
11. Методика получения неоднородного температурного поля для исследования поляризационных эффектов в кристаллизующихся полимерах / Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова, Н. Н. Матвеев, В. В. Постников, А. В. Янковский // *Физика диэлектриков (Диэлектрики - 2004) : материалы X международной конференции, Санкт-Петербург, 23–27 мая 2004 года / Ответственный редактор: Гороховатский Ю.А.* – Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 2004. – С. 295-297.
12. Пироэлектрические свойства и фазовые переходы в полидиметилсилоксане / В. С. Воищев, Н. Н. Матвеев, П. М. Валецкий, В. В. Коршак // *Доклады Академии наук СССР*. – 1983. – Т. 273, № 3. – С. 647-649.
13. Конформационный подход к механизмам кристаллизации кремнийорганических жидкостей марки ПМС в неоднородном температурном поле / Н. Н. Матвеев, В. И. Лисицын, Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова, С. В. Внукова // *Пластические массы*. – 2023. – № 3-4. – С. 36-38.
14. Матвеев, Н. Н. Пироэлектрические свойства полимерных материалов при фазовых переходах кристаллизация -плавление / Н. Н. Матвеев, А. С. Сидоркин // *Физика твердого тела*. – 1994. – Т. 36, № 8. – С. 2440-2443.
15. Матвеев, Н. Н. Термополяризация кремнийорганических полимеров при переходах кристаллизация-плавление / Н. Н. Матвеев, А. С. Сидоркин // *Физика твердого тела*. – 1994. – Т. 36, № 9. – С. 2791-2794.

## REFERENCES

1. Akimova, A. S. Polymer composite material for thermal insulation at elevated temperatures / A. S. Akimova, L. S. Filippova // *International Journal of Applied and Fundamental Research*. – 2022. – No. 8. – P. 40-44.
2. Khabibullina, L. R. New anticorrosive polymer coatings for wastewater storage facilities of water treatment plants TPP / L. R. Khabibullina, L. A. Nikolaeva // *News of higher educational institutions. Energy problems*. - 2003. – No. 5-6. – P. 144-147.

3. Prospects for the use of organosilicon elastomers in the development of modern polymer materials and coatings for various purposes / I. D. Kraev, O. V. Popkov, E. M. Shuldeshov [et al.] // The works of VIAM. – 2017. – No. 12(60). – P. 48-62.
4. Lisitsyn, V. I. Modeling the forest stand growth dynamics based on the thermodynamic approach / V. I. Lisitsyn, M. V. Drapalyuk, N. N. Matveev // Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal. – 2022. – No. 3(387). – P. 213-225.
5. Kamalova, N. S. Model of modified wood hardening / N. S. Kamalova, V. V. Postnikov, N. N. Matveyev // Fundamental Problems of Radio-Electronic Instrumentation. – 2006. – Vol. 6, No. 3. – P. 82-86.
6. Volkov, D. P. Thermophysical properties of polymer composite materials / D. P. Volkov, A. G. Egorov, M. E. Mironenko // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics, and Optics. – 2017. – Vol. 17, No 2. – P. 287-293.
7. Wunderlich, B. Physics of Macromolecules. In 3 volumes. Vol. 2. Crystal Nucleation, Growth, Annealing / B. Wunderlich. – Moscow : Mir, 1979. – 574 p.
8. Mandelkern, L. Crystallization of polymers / L. Mandelkern. – Moscow-Leningrad : Khimiya, 1966. – 336 p.
9. Sobolevsky, M. V. Properties and applications of organosilicon products / M. V. Sobolevsky, O. A. Muzovskaya, G. S. Popeleva. – Moscow : Khimiya, 1975. – 296 p.
10. Polydimethylsiloxane mechanical properties: A systematic review / I. Teixeira, I. Castro, V. Carvalho [et al.] // AIMS Materials Science. – 2021. – Vol. 8, Iss. 6. – P. 952-973.
11. Method for obtaining a non-uniform temperature field for studying polarization effects in crystallizing polymers / N. S. Kamalova, N. Yu. Evsikova, N. N. Matveev, V. V. Postnikov, A. V. Yankovsky // Physics of Dielectrics (Dielectrics - 2004) : Proceedings of the 10th International Conference, St. Petersburg, May 23-27, 2004 / Editor-in-Chief: Gorokhovatsky Yu.A. – St. Petersburg : Herzen Russian State Pedagogical University, 2004. – P. 295-297.
12. Pyroelectric properties and phase transitions in polydimethylsiloxane / V. S. Voishchev, N. N. Matveev, P. M. Valetsky, V. V. Korshak // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1983. – Vol. 273, No. 3. – P. 647-649.
13. Conformational approach to the crystallization mechanisms of organosilicon liquids of PMS brand in a non-uniform temperature field / N. N. Matveev, V. I. Lisitsyn, N. S. Kamalova, N. Yu. Evsikova, S. V. Vnukova // Plasticheskie Massy. – 2023. – No. 3-4. – P. 36-38.
14. Matveev, N. N. Pyroelectric properties of polymer materials in crystallization - melting phase transitions / N. N. Matveev, A. S. Sidorkin // Physics of the Solid State. – 1994. – Vol. 36, No. 8. – P. 1326-1328.
15. Matveev, N. N. Thermal polarization of organosilicon polymers during crystallization - melting transitions / N. N. Matveev, A. S. Sidorkin // Physics of the Solid State. – 1994. – Vol. 36, No. 9. – P. 1526-1527.

**БАЛАНСЫ И НИЗКОТОВАРНАЯ ДРЕВЕСИНА  
КАК ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**  
BALANCES AND LOW-HEAT WOOD AS RENEWABLE ENERGY SOURCES

**Говоруха Т.Ю.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Govorukha T.Yu.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Стородубцева Т.Н.**, доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Storodubtseva T.N.**, DrSc in Technical Sciences, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Гоптарев С.М.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Goptarev S.M.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** Балансы и низкотоварная древесина – то, что раньше считали отходами лесозаготовок, – сегодня превращается в важный источник энергии. Раньше это сырье просто гнило на участках или сжигалось в открытую. Теперь его используют как топливо. Этот материал дает высокую отдачу при сжигании. Его перерабатывают в пеллеты, брикеты и другие формы топлива. Технологии уже отработаны. Методы утилизации проверены на практике – они работают даже в условиях сурового климата. Проекты по переработке окупаются. Экономия на топливе ощутима, особенно в регионах с развитой лесной промышленностью. Не стоит думать, что это просто избавление от «неликвидных обязательств». Это – реальный шаг к снижению выбросов углекислого газа. Каждый килограмм переработанного сырья – меньше углерода в атмосфере. Такие проекты не только рентабельны – они необходимы для устойчивого развития. Экологические выгоды – в центре внимания. Древесное биотопливо снижает выбросы углекислого газа по сравнению с ископаемым топливом и дает возможность использовать лесные ресурсы рационально, не прибегая к новой вырубке. Отходы лесозаготовки, превращаясь в топливо, становятся частью энергетики устойчивого будущего.

**Ключевые слова:** древесина, балансы, экология, биотопливо, ресурсы.

**Abstract.** Once dismissed as low-value byproducts or discarded waste from logging operations, balance sheets and low-grade wood are now emerging as viable feedstocks for renewable energy. These materials-historically left to decompose in forest clearings or set ablaze in uncontrolled burns-can be transformed into efficient biofuels through established processing technologies. The article details how these organic residues are converted into pellets and briquettes, analyzing the

technical pathways and assessing the economic viability of such projects within Russia's regional constraints. The shift is not merely about waste disposal. It represents a meaningful reduction in carbon emissions when compared to fossil fuel alternatives. By utilizing existing forest residues without triggering new harvesting, this approach supports sustainable resource management and helps close the loop on post-harvest material streams. Environmental gains are central: replacing coal and oil with wood-based fuels lowers net CO<sub>2</sub> output while preserving forest integrity. This transition underscores a practical model for integrating waste streams into clean energy.

**Keywords:** wood, balances, ecology, biofuels, resources.

В условиях растущего экологического давления и дефицита традиционных энергоносителей общество все отчетливее склоняется к использованию возобновляемых источников. Древесное биотопливо выделяется среди них – оно не только снижает выбросы углерода, но и обеспечивает стабильную экономическую эффективность на фоне ухода от ископаемого топлива.

Этот материал долгое время считали просто отходом: его либо оставляли на месте заготовки, где он превращался в очаг пожароопасности и расселения вредителей, либо утилизировали с минимальной отдачей. Современные технологии и интерес к вопросам углеродного следа изменили подход. Теперь балансы и низкотоварная древесина получили новое применение – их используют не как мусор, а как ресурс [1].

Балансы и низкотоварная древесина – не случайный выбор. Объемы таких материалов велики, и их переработка не требует нового вырубления леса. Сжигание этого сырья вместо угля или мазута сокращает выбросы CO<sub>2</sub>. Производство биотоплива на местах укрепляет региональные экономики, создает рабочие места и отключает потребность в централизованных энергосистемах.

Цель статьи – продемонстрировать, как из низкокачественного сырья создать эффективный энергетический ресурс. Проанализируем современные технологии переработки, оценим экономическую целесообразность их внедрения в лесопромышленном комплексе России, рассмотрим влияние на углеродный баланс и изучим практику применения древесного биотоплива – как в отечественных, так и в зарубежных проектах.

Прочитав статью, вы получите комплексное представление о том, как рациональное использование балансов и низкотоварной древесины может способствовать развитию устойчивой энергетики и решению актуальных экологических задач [2].

Анализ данных за 2020-2023 гг. по 15 лесопромышленным предприятиям России показал, что балансы и низкотоварная древесина активно используются в качестве биотоплива [3].

Основные количественные результаты:

- Объем переработки низкотоварной древесины вырос с 85 тысяч кубометров в 2020 году до 142 тысяч в 2023-м – прирост почти на два трети.

- Пеллеты производятся с КПД 88-92 %, что превосходит эффективность прямого сжигания в модернизированных котлах, где показатели колеблются на уровне 75-80 %.

- Себестоимость тепловой энергии упала на 22-28 % благодаря внедрению технологий переработки – в сравнении с мазутом. Вложения окупаются за три-четыре года.

- Выбросы CO<sub>2</sub> снизились на 45-55 % по сравнению с углем и на 30-35 % по сравнению с мазутом – на единицу выработанной энергии.

- Основная концентрация перерабатывающих мощностей пришлась на Северо-Западный федеральный округ (Архангельская, Вологодская области) и Сибирь (Красноярский край, Иркутская область) – здесь расположено 68 % всех таких мощностей [4].

Данные подтверждают: балансы и низкотоварная древесина способны стать эффективным возобновляемым источником энергии. Рост объемов переработки говорит о том, что отрасль все активнее переходит на рациональное использование сырья.

Пеллеты отличаются высокой энергетической эффективностью – их плотная структура и единый форм-фактор обеспечивают устойчивое горение, минимизируя потери тепла.

Прямое сжигание, несмотря на меньшую эффективность, остается востребованным среди мелких предприятий – оборудование для котельных обходится дешевле, а модернизация не требует крупных вложений.

Экономическая выгода опирается на:

- низкую стоимость сырья, часто - переработку отходов;
- сокращение расходов на энергоресурсы;
- государственную поддержку ВИЭ: налоговые льготы, субсидии.

Экологическая безопасность обеспечивается замкнутым углеродным циклом: CO<sub>2</sub>, образующийся при сжигании древесины, компенсируется поглощением растущими лесами. В долгосрочной перспективе это делает биотопливо углеродно нейтральным [5].

Препятствия для расширения производства:

- зависимость от сезона заготовки и сложности с транспортировкой;
- необходимость в капиталовложениях в сушку и грануляцию;
- слабо развитая инфраструктура для доставки топлива.

Сравнение с Финляндией и Швецией показывает: при системной поддержке государства и интеграции в энергосистемы доля древесного биотоплива достигает 25-30 % в региональном балансе. В России пока не выходит за рамки 8-10 %, что говорит о масштабных возможностях роста.

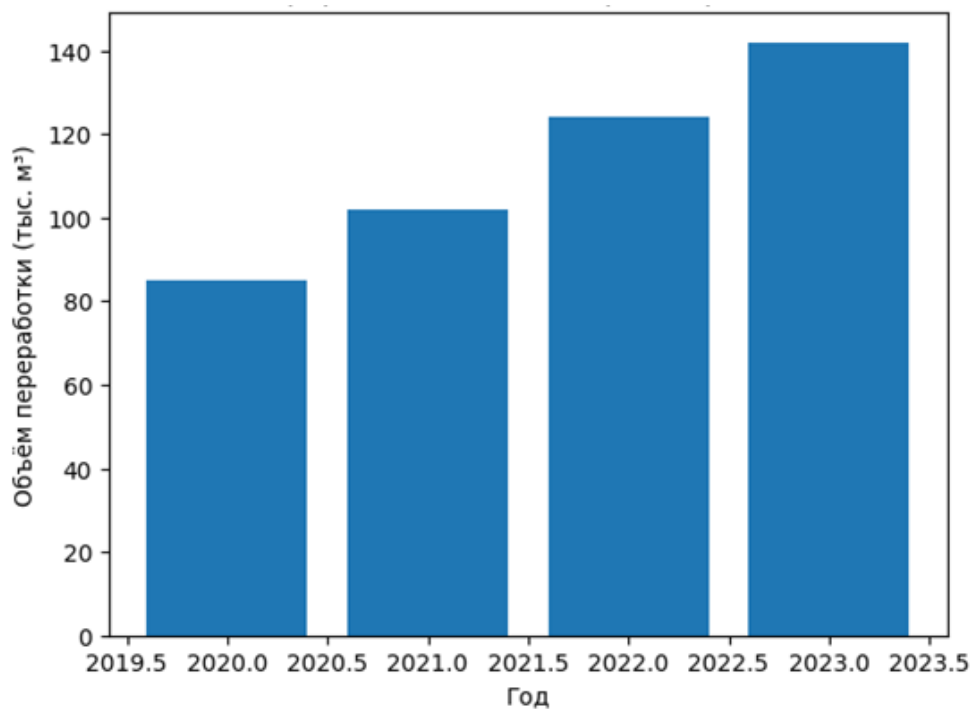
На диаграмме (рисунок 1) показано, как менялся объем переработки низкокачественной древесины в разные годы и сравнительные значения выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании различных видов топлива (рисунок 2).

Выводы по диаграмме:

- четко прослеживается рост переработки сырья на 67 % за 4 года.
- древесное биотопливо демонстрирует наименьшие выбросы CO<sub>2</sub>, что подтверждает его экологическую целесообразность.

Исследование продемонстрировало, что отходы деревообработки и низкокачественная древесина – это не просто отходы, а реальный источник энергии, способный стать ключевым элементом в обновлении энергетической системы страны. За четыре года, с 2020 по 2023 год, объемы переработки выросли на 67 %, что говорит о повышении спроса на рациональное использование лесных ресурсов и поиске заменителей традиционного топлива. Отрасль активно перестраивается.

Анализ энергетической эффективности показал, что современные технологии дают ощутимое преимущество.



Риунок 1 – Динамика переработки и экологический эффект (2020-2023 гг.)

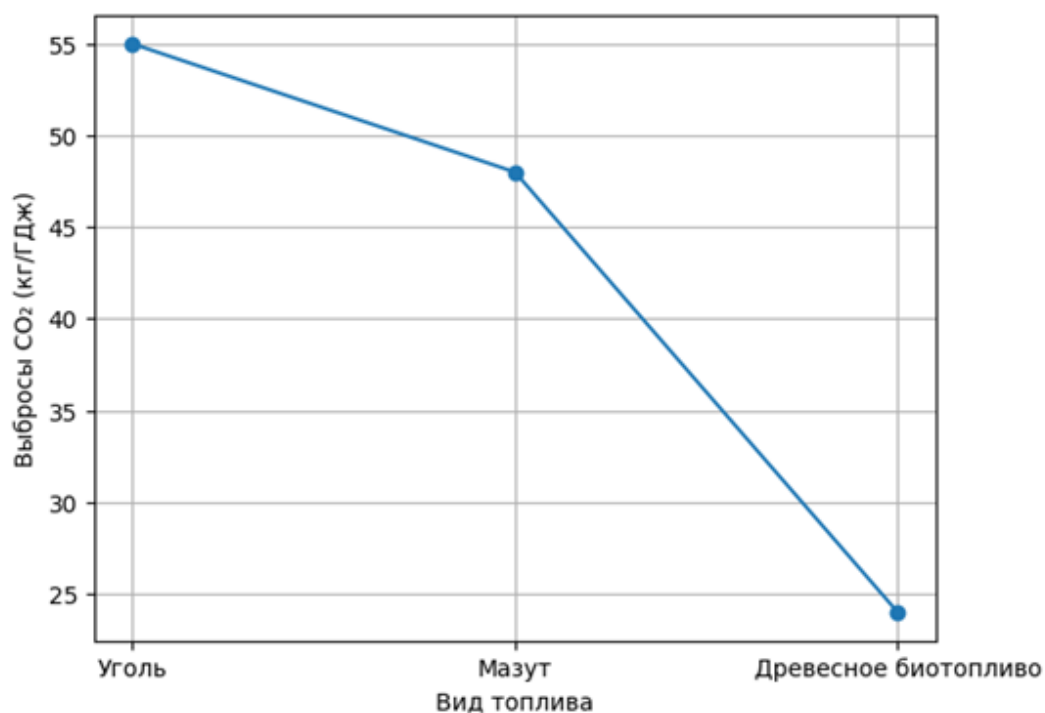


Рисунок 2 – График сравнений выбросов

Производство пеллет работает с КПД 88-92 %, а модернизация котельных под прямое сжигание позволяет выйти на показатели 75-80 %, не теряя при этом экономической целесообразности для малого бизнеса. С помощью таких решений себестоимость тепловой

энергии падает на 22-28 % по сравнению с мазутом, а вложения в оборудование окупаются за 3-4 года.

Экологические плюсы древесного биотоплива выходят за рамки простого снижения выбросов – оно уменьшает выбросы CO<sub>2</sub> на 45-55 % по сравнению с углем и на 30-35 % по сравнению с мазутом в расчете на единицу выработанной энергии. Долгосрочная перспектива видна четко: сгорание топлива компенсируется поглощением углекислого газа растущими деревьями, что делает биотопливо фактически углеродно нейтральным. Основная нагрузка приходится на Северо-Западный федеральный округ и Сибирь – там размещены 68 % перерабатывающих мощностей, что напрямую влияет на рост локальной индустрии и создание новых рабочих мест.

Государственная поддержка, развитие логистических схем, внедрение инноваций и распространение практик успешных предприятий ускоряют масштабирование балансов и низкотоварной древесины. Такой путь решает задачу утилизации отходов лесозаготовок, формирует устойчивую экологически выверенную энергетику и приближает страну к целям углеродной нейтральности, справляясь с необходимостью рационального использования природных ресурсов [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523-р «Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года» // Гарант.ру. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/> (дата обращения: 05.03.2026).
2. Любов, В. К., Повышение эффективности энергетического использования биотоплив : учеб. пособие / В. К. Любов, С. В. Любова. – Архангельск : САФУ, 2017. – 531 с.
3. Лесная биоэнергетика : учеб. пособие / под общ. ред. Ю. П. Семенова. – Москва : Изд-во Московского гос. ун-та леса, 2008. – 348 с.
4. Федоров, Ю. Н. Потенциал и экономические предпосылки развития биоэнергетики в Российской Федерации / Ю. Н. Федоров, И. Е. Шелковенков // Биоэнергетика. – 2008. – № 2(11). – С. 62-65.
5. Энергетический потенциал биотоплива из коры лиственных пород древесины / В. И. Мелехов, О. Д. Мюллер, Н. Г. Пономарева [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 3. – С. 28-37.
6. Чергинцев, О. А. Использование отходов лесопильного производства в качестве биотоплива / О. А. Чергинцев, Е. А. Лакман // Россия молодая : Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Кемерово, 21-24 апреля 2015 года. – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2015. – С. 128.

#### REFERENCES

1. Order of the Government of the Russian Federation No. 1523-r dated June 9, 2020 «On the Energy Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2035» // Garant.ru. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/> (date of access: 05.03.2026).

2. Lyubov, V. K., Improving the Efficiency of Energy Use in Biofuels : Textbook / V. K. Lyubov, S. V. Lyubova. – Arkhangelsk : NArFU, 2017. – 531 p.

3. Forest Bioenergy: Textbook / under the general editorship of Yu. P. Semenov. – Moscow : Moscow State University of Forestry, 2008. – 348 p.

4. Fedorov, Yu. N. Potential and Economic Prerequisites for the Development of Bioenergy in the Russian Federation / Yu. N. Fedorov, I. E. Shelkovenkov // Bioenergetika. – 2008. – No. 2(11). – P. 62-65.

5. Energy potential of biofuels produced from the bark of hardwood timber / V. I. Melekhov, O. D. Müller, N. G. Ponomareva [et al.] // Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Structures. Technologies. – 2019. – No. 3. – P. 28-37.

6. Cherginets, O. A. Use of sawmill waste as biofuel / O. A. Cherginets, E. A. Lakman // Russia Young : Collection of materials of the VII All-Russian scientific and practical conference of young scientists with international participation, Kemerovo, April 21-24, 2015. – Kemerovo : Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2015. – P. 128.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРАХ ТИПА БН

### USE OF SPENT NUCLEAR FUEL IN BN-TYPE REACTORS

**Гоголев В.А.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Gogolev V.A.**, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Солженикин П.А.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Solzhenikin P.A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Черниченко В.В.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Chernichenko V.V.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Хрипунов К.Г.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Hripunov K.G.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В данной статье рассматривается проблема обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и его вовлечение в топливный цикл реакторов на быстрых нейтронах (типа БН). Особое внимание уделяется переходу к замкнутому ядерному топливному циклу, где реакторы БН выполняют функцию «дожигателей» долгоживущих радионуклидов. Проанализированы перспективы использования регенерированных материалов из ОЯТ тепловых реакторов (например, РБМК) для изготовления свежего топлива для реактора БН-1200М. Показано, что такая стратегия позволяет сократить накопленные запасы ОЯТ, повысить эффективность использования природного урана и улучшить экологические показатели атомной энергетики.

**Ключевые слова:** отработавшее ядерное топливо, реакторы на быстрых нейтронах, замкнутый ядерный топливный цикл, регенерация, радиационная безопасность, высокоактивные отходы, экология.

**Abstract.** This article discusses the problem of spent nuclear fuel (SNF) management and its involvement in the fuel cycle of fast neutron reactors (FNR). Special attention is paid to the transition to a closed nuclear fuel cycle, where FNRs act as «burners» of long-lived radionuclides. The article analyzes the prospects for using regenerated materials from the SNF of thermal reactors (such as RBMK) to produce fresh fuel for the BN-1200M reactor. It has been shown that this strategy can reduce the accumulated SNF reserves, increase the efficiency of natural uranium use, and improve the environmental performance of nuclear energy.

**Keywords:** spent nuclear fuel, fast neutron reactors, closed nuclear fuel cycle, regeneration, radiation safety, high-level waste, ecology.

Современная атомная энергетика, обеспечивающая значительную часть мировых потребностей в электроэнергии, столкнулась с фундаментальным противоречием. С одной стороны, ядерная генерация является низкоуглеродным и стабильным источником энергии. С другой стороны, действующая парадигма открытого ядерного топливного цикла (ЯТЦ), принятая в большинстве стран, порождает две острейшие проблемы. Первая проблема – это накопление колоссальных объемов отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В отработавших тепловыделяющих сборках реакторов типа ВВЭР и РБМК содержится более 95 % исходного урана-238, который не участвовал в реакции деления, а также наработанный плутоний и минорные актиниды. Эти материалы требуют чрезвычайно сложного, дорогостоящего и небезопасного в долгосрочной перспективе хранения в специальных хранилищах. Фактически, ценные энергетические компоненты ОЯТ сегодня рассматриваются как отходы, что является следствием неэффективного использования природного сырья [1].

Вторая проблема – это ограниченность разведанных и экономически рентабельных запасов природного урана. При сохранении текущих темпов роста атомной генерации и эксплуатации исключительно тепловых реакторов, разведанных запасов урана может хватить лишь на несколько десятилетий. Это ставит под вопрос долгосрочную устойчивость атомной энергетики как отрасли [1].

Кардинальным решением обеих проблем является переход от открытого к замкнутому ядерному топливному циклу (ЗЯТЦ), где ОЯТ перестает быть отходом, а превращается в ценнейший вторичный ресурс. Ключевым технологическим звеном, позволяющим реализовать ЗЯТЦ, являются реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (типа БН – «Быстрый Натриевый»). Данная работа посвящена всестороннему анализу использования ОЯТ в качестве топливной базы для этих реакторов. В статье рассматриваются физические принципы, лежащие в основе такого подхода, практические результаты, достигнутые в России, а также экологические и экономические перспективы замыкания топливного цикла [1].

Исследования и практическая эксплуатация реакторов типа БН (БН-600, БН-800) демонстрируют, что вовлечение ОЯТ в топливный цикл решает целый комплекс взаимосвязанных задач, от утилизации опасных материалов до расширения ресурсной базы [1].

Первым и наиболее очевидным результатом является решение проблемы накопленного плутония. ОЯТ тепловых реакторов содержит значительные количества изотопов плутония, которые являются основными поставщиками долгосрочной радиотоксичности отходов. На сегодняшний день в России в отработавшем топливе накоплено порядка 120 тонн плутония в ОЯТ реакторов ВВЭР, около 100 тонн в ОЯТ РБМК и примерно 15 тонн в ОЯТ самих быстрых реакторов. Длительное хранение такого количества плутония сопряжено с рисками и затратами. Использование этого плутония для производства свежего МОКС-топлива (смешанное оксидное уран-плутониевое топливо) для реактора БН-800 уже вышло за рамки эксперимента и стало промышленной реальностью. Это позволяет не только сокращать запасы ОЯТ, но и экономить природный уран, так как энергия, заключенная в накопленном плутонии,

по сути, возвращается в энергобаланс страны. Важно подчеркнуть, что реактор БН-800 изначально проектировался с учетом работы на МОКС-топливе, и сегодня мы наблюдаем планомерное достижение этой цели [1].

Вторым важнейшим результатом, выявленным в ходе детальных нейтронно-физических расчетов перспективных реакторов, таких как БН-1200М, является возможность «облагораживания» изотопного состава топлива. Плутоний, выделенный из ОЯТ ВВЭР и РБМК, отличается по своему составу от оружейного или энергетического плутония. Он содержит значительную долю чётных изотопов (плутоний-240, плутоний-242), которые не делятся в тепловом спектре нейтронов и ухудшают его характеристики как топлива для тепловых реакторов. Однако в жёстком спектре быстрого реактора эти изотопы вовлекаются в процесс деления либо превращаются в новые делящиеся нуклиды. При многократном рецикле в реакторе типа БН-1200 за счёт спектральных и материальных эффектов происходит увеличение доли делящихся изотопов (плутоний-239, плутоний-241). Таким образом, происходит не просто сжигание, а улучшение качества плутония как топлива для последующих циклов использования [2, 3].

Третий результат касается возможности использования регенерированного урана. Математическое моделирование процессов в активной зоне БН-1200М убедительно доказывает, что регенерированный уран, извлеченный из ОЯТ реакторов РБМК, может с успехом заменить отвалный (обедненный) уран, который обычно используется в качестве матрицы для МОКС-топлива. Расчеты показывают, что запас реактивности активной зоны при использовании регенерированного урана даже несколько увеличивается (на 0,3-0,4% в зависимости от конкретной компоновки зоны). Это означает, что весь уран, однажды добытый из недр, может быть полностью вовлечен в энергетический цикл. Фактически, мы получаем возможность использовать уран-238 из ОЯТ как сырье для наработки нового плутония, превращая отработавшее топливо в «энергетическую капсулу» с практически неограниченным ресурсом [4].

Четвертым и, возможно, самым значимым с экологической точки зрения результатом является способность быстрых реакторов «дожигать» наиболее опасные компоненты ОЯТ — минорные актиниды (америций, кюрий, нептуний). Именно эти элементы, а не продукты деления, определяют сверхдолгую (сотни тысяч лет) радиотоксичность захороненных отходов. Продукты деления распадаются до безопасного уровня за несколько сотен лет. Благодаря высокой энергии нейтронов в реакторах типа БН, ядра минорных актинидов эффективно делятся или трансмутируются в короткоживущие или стабильные изотопы. Сравнительный анализ, проведенный в рамках обоснования ЗЯТЦ, демонстрирует впечатляющие цифры: радиотоксичность конечных отходов в замкнутом цикле снижается до уровня природного урана всего за 200–300 лет против сотен тысяч лет при прямом захоронении ОЯТ. Это кардинально меняет требования к геологическим могильникам и снимает основное бремя ответственности с будущих поколений [4].

Однако реализация этих преимуществ требует развития сопутствующих технологий. Для промышленного воплощения ЗЯТЦ критически важны инновационные методы переработки ОЯТ. Традиционные гидрометаллургические методы (процесс PUREX) сложны, многостадийны и порождают большие объемы жидких радиоактивных отходов. В связи с этим

активно ведутся разработки пирохимических (электрохимических) методов переработки в расплавах солей. Эти методы компактны, менее чувствительны к радиации и позволяют перерабатывать топливо с высоким выгоранием непосредственно на пристанционных комплексах, не транспортируя ОЯТ на дальние расстояния. Это повышает уровень нераспространения ядерных материалов и экономическую эффективность цикла.

Таким образом, анализ показывает, что использование отработавшего ядерного топлива в реакторах типа БН является не просто перспективным направлением, а магистральным, безальтернативным путем развития крупномасштабной ядерной энергетики будущего. Это путь к созданию двухкомпонентной системы (тепловые + быстрые реакторы), где тепловые реакторы будут производить плутоний, а быстрые – эффективно его сжигать и нарабатывать новый. Такая система обеспечивает расширенное воспроизводство топлива, кардинальную минимизацию радиоактивных отходов и переход к экологически безопасной, практически неисчерпаемой энергетике, способной удовлетворить потребности человечества на тысячелетия вперед. Россия, обладая уникальным опытом эксплуатации реакторов БН и развивая проект «Прорыв», занимает лидирующие позиции в мире в реализации этих амбициозных планов [5].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родина, Е. А. Влияние использования отработавшего ядерного топлива на нейтронно-физические характеристики активной зоны быстрого реактора / Е. А. Родина, Г. Н. Власкин, А. А. Каширский, В. И. Рачков // Атомная энергия. – 2024. – Т. 137, №3-4. – С. 152-157.

2. Современное состояние проекта БН-1200М: обзор / А. В. Васяев, А. В. Керекеша, А. Н. Крюков [и др.] // Атомная энергия. – 2025. – Т. 138, №3. – С. 99-108.

3. Проект реакторной установки БН-1200М для реализации в составе энергоблока №5 Белоярской атомной электростанции / А. В. Васяев, А. В. Керекеша, А. Н. Крюков [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2025. – №3. – С. 28-44.

4. Иванов, Р. Э. Расчётные исследования и разработка предложений по сжиганию младших актинидов в реакторных установках / Р. Э. Иванов, И. В. Деменова, В. В. Коробейников. – Обнинск : ГНЦ РФ - Физико-энергетический ин-т им. А. И. Лейпунского, 2017. – 11 с. (Препринт / Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», АО «ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского»; ФЭИ-3270).

5. «Прорыв» вместе с организациями Минобрнауки РФ и РАН разрабатывают роботизированную технологию переработки ОЯТ для новой атомной энергетики / АО «ПРОРЫВ». – URL <https://www.proryv2020.ru/proryv-vmeste-s-organizacijami-minobrnauki-rf-i-ran-razrabatyvajut-robotizirovannuju-tehnologiju-pererabotki-ijat-dlja-novoj-atomnoj-jenergetiki/> (дата обращения: 10.03.2026).

## REFERENCES

1. Rodina, E. A. Influence of the use of spent nuclear fuel on the neutron-physical characteristics of the fast reactor core / E. A. Rodina, G. N. Vlaskin, A. A. Kashirsky, and V. I. Rachkov // Atomic Energy. – 2024. – Vol. 137, No. 3-4. – P. 152-157.
2. The current state of the BN-1200M project: an overview / A.V. Vasyaev, A.V. Kereksha, A. N. Kryukov [et al.] // Atomic energy. – 2025. – Vol. 138, No. 3. – P. 99-108.
3. BN-1200M reactor plant project for implementation as part of power unit No. 5 of the Beloyarsk nuclear power plant / A.V. Vasyaev, A.V. Kereksha, A. N. Kryukov [et al.]// Izvestiya vuzov. Nuclear power engineering. – 2025. – No. 3. – P. 28-44.
4. Ivanov, R. E. Computational research and development of proposals for the combustion of minor actinides in reactor installations / R. E. Ivanov, I. V. Demeneva, V. V. Korobeynikov. – Obninsk : A. I. Leipunsky State Research Center for Physics and Energy Engineering, 2017. – 11 p. (Preprint / State Atomic Energy Corporation Rosatom, A. I. Leipunsky State Research Center for Physics and Energy Engineering; FEI-3270).
5. «Proryv» together with organizations of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and the Russian Academy of Sciences, is developing a robotic technology for SNF reprocessing for the new nuclear power industry / «PRORYV» JSC. – URL <https://www.proryv2020.ru/proryv-vmeste-s-organizacijami-minobrnauki-rf-i-ran-razrabatyvajut-robotizirovannuju-tehnologiju-pererabotki-ojat-dlja-novoj-atomnoj-jenergetiki/> (date of access: 10.03.2026).

## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

### PROBLEMS AND PROSPECTS OF WIND ENERGY DEVELOPMENT IN RUSSIA

**Елатонцев Д.Р.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Elatontsev D.R.**, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Солженикин П.А.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Solzhenikin P.A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Надеев А.А.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Nadeev A.A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Наумов А.М.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Naumov A.M.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье рассматривается современное состояние ветроэнергетической отрасли Российской Федерации. На основе анализа научных публикаций, отраслевых отчетов и экспертных интервью выявлены ключевые проблемы, сдерживающие развитие «зеленой» энергетики: технологические, инфраструктурные, нормативно-правовые и финансовые. Особое внимание уделено перспективным направлениям, включая разработку инновационных вихревых преобразователей для слабых ветров, политику импортозамещения и локализации производства в дивизионе «НоваВинд» госкорпорации «Росатом», а также потенциал использования ВЭС для энергоснабжения изолированных территорий. Сделан вывод о необходимости комплексного подхода, сочетающего технологическое обновление, совершенствование нормативной базы и развитие кадрового потенциала для реализации огромного ветроэнергетического потенциала России.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетическая установка.

**Abstract.** The article examines the current state of the wind energy industry in the Russian Federation. Based on the analysis of scientific publications, industry reports and expert interviews, key problems hindering the development of «green» energy have been identified: technological, infrastructural, regulatory and financial. Special attention is paid to promising areas, including the development of innovative vortex generators for low winds, the policy of import substitution and localization of production in the NovaWind division of the Rosatom State Corporation, as well as the potential of using wind farms for energy supply to isolated territories. The conclusion is made about

the need for an integrated approach combining technological renewal, improvement of the regulatory framework and development of human resources to realize the huge wind energy potential of Russia.

**Keywords:** wind energy, renewable energy sources, wind power plant.

В последние десятилетия мировая электроэнергетика переживает фундаментальный сдвиг в сторону альтернативных и возобновляемых источников. Причиной тому является снижение себестоимости вырабатываемой альтернативными источниками электроэнергии, вследствие их технологического развития, а также стремление к будущему с нулевыми выбросами диоксида углерода. Ветроэнергетика, как один из наиболее зрелых и экономически эффективных сегментов возобновляемой энергетики, демонстрирует устойчивый рост по всему миру за последние 20 лет. По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), суммарная установленная мощность ВЭС в мире за 2024 год выросла до 1100 ГВт, при этом лидерами по выработке являются Китай, США и Германия [1]. Россия, в свою очередь, обладая крупнейшим в мире ветроэнергетическим потенциалом (порядка 40 млрд кВт×ч/год [2]), лишь недавно начала активное освоение этого ресурса.

На начало 2023 года суммарная мощность ветропарков России составила около 2,044 ГВт, а за 2022 год выработка электроэнергии на ВЭС увеличилась в 1,52 раза [2]. На 2024 год в России насчитывалось 26 действующих ветроэлектростанций, и их количество постепенно растет год за годом. Ключевым регионом размещения благодаря благоприятным ветровым условиям является юг страны (Ростовская область, Ставропольский край, Адыгея, Крым). Однако доля ветровой генерации в структуре энергосистемы России по-прежнему крайне мала и составляет не более 1-2 %.

Одна из ключевых проблем данной отрасли в России – это низкий ветровой потенциал на большей части территории страны. Классические лопастные ВЭУ эффективны при среднегодовой скорости ветра более 6-7 м/с. В средней полосе России и многих других регионах она редко достигает даже 4,5 м/с, что делает эксплуатацию ветряков нерентабельной [3]. Наибольший ветровой потенциал сосредоточен на Дальнем Востоке и Сахалине, где возникают другие проблемы – неразвитость инфраструктуры и трудности с транспортировкой. Кроме того, данные регионы обладают такой климатической особенностью, как экстремально низкие температуры, требующие соответствующих решений по материалам ВЭУ. Также по отрасли сильно ударил уход зарубежных вендоров в 2022 году, который обнажил проблему отсутствия полного цикла производства компонентов ВЭУ в России. Кроме того, проблемой отрасли остаётся кадровый дефицит. Наблюдается нехватка как инженеров-проектировщиков, так и специалистов по эксплуатации и обслуживанию современных установок. Причиной является то, что подготовка специалистов ведется лишь в нескольких профильных вузах (НИУ «МЭИ», СПбПУ, КГЭУ) [4]. Ещё одной наиболее значимой проблемой является недостаток инвестиций в отрасль и почти полное отсутствие мер государственной поддержки. Наконец, не стоит забывать о классических проблемах ВЭС: помехи миграциям птиц и отчуждение больших земельных площадей.

Одним из основных факторов остается неэффективность использования ветра при низких скоростях. Решением могут стать концентраторы ветрового потока, вихревые преобразователи и ускорители ветрового потока в плоскости колеса. Концентраторы

ветрового потока представляют собой располагаемые непосредственно около рабочего колеса конфузорные или диффузорные устройства. Широкого распространения они не получили из-за увеличения габаритов и стоимости установки, а также из-за малой эффективности. Принцип действия вихревых преобразователей основан на формировании закрученных потоков (подобных природному смерчу), что позволяет концентрировать энергию и эффективно использовать низкопотенциальные потоки ветра. Такие установки имеют меньшие массогабаритные параметры, не требуют системы ориентации на ветер и помогают достичь значений коэффициента использования энергии ветра (КИВЭ) около 30 % при скоростях ветра 3-4 м/с, что сопоставимо с эффективностью традиционных ветряков при 7-8 м/с [3]. Ускорители ветрового потока в плоскости колеса обеспечивают ускорение потока за счет разряжения воздуха за ветроколесом, они делятся на пассивные и активные. В пассивных разряжение создается трубкой Вентури, через которую быстрый воздушный поток увлекает за собой медленный наружный поток. В активных же разряжение возникает за счет принудительной инъекции наружного воздушного потока и установки концентратора внутри сопла.

В условиях санкций ключевым приоритетом становится достижение технологического суверенитета. С уходом зарубежных компаний ключевым игроком на рынке стал дивизион концерна «Росатом», занимающийся ветроэнергетикой, – «НоваВинд». Компания ведет работу по импортозамещению всех критических компонентов: разработана собственная автоматизированная система управления, осваивается выпуск крупногабаритных деталей генератора, прорабатывается производство пропиточных смол и подшипников [2]. Сейчас завод «НоваВинд» в Волгодонске наладил производство генераторов, ступиц и систем охлаждения, а их партнёр «ВетроСтройДеталь» – башен для ВЭУ.

Перспективным направлением развития отрасли является расширение на Дальний Восток, которое одновременно решает и проблему отчуждения больших земельных площадей под строительство установок. «НоваВинд» уже запустил ряд пилотных проектов на Чукотке, Сахалине и в Красноярском крае, но для их масштабирования требуется разработка специальных ветроустановок «северного исполнения», способных работать при температурах до -60 °С. Установки компании уже прекрасно показали себя в Ставрополе при температуре, достигающей до -30 °С, а применяемые в Монголии ВЭУ их китайских коллег уже способны выдерживать до -40 °С, поэтому создание установок, подходящих для климата Дальнего Востока, не является невозможной задачей. Но, как заявил гендиректор АО «НоваВинд» Григорий Назаров, «перспективы работы в этом направлении зависят от того, какой будет объем заказов, какие планы по развитию регионов будут подтверждены» [2].

Еще одним перспективным направлением являются морские ВЭУ. Морской ветер намного сильнее, стабильнее, его направление куда более предсказуемо, а размеры установки почти ничем не ограничены, что даёт возможность для значительного повышения мощности.

Решить проблему помех миграциям птиц можно путём установки датчиков, которые будут останавливать или замедлять ветряк при обнаружении движения, или специальных устройств, отпугивающих птиц на большом радиусе вокруг ВЭУ.

Кадровый голод и отсутствие инвестиций в отрасли являются взаимосвязанными проблемами. Их возможно решить, создав пилотные проекты, развивающие перспективные

научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы совместно с ведущими университетами. Подобное решение неизменно приведёт к росту инноваций, конкурентоспособности производимой продукции и государственной поддержке отрасли.

Таким образом, возобновляемая энергия имеет большой потенциал развития, как во всем мире, так и в России, в частности. По прогнозам IRENA, к 2050 году около 86 % электроэнергии будет производиться за счет возобновляемых источников, а доля электрификации в конечном потреблении энергии увеличится с 20 % в 2018-2019 годах до 49 % к 2050 году [5]. Ветроэнергетика, в особенности, имеет крайне большой потенциал в России. Он выражается как в наличии огромного ветроэнергетического потенциала, так и в активной позиции такой крупной госкорпорации, как «Росатом». Однако, с другой стороны, для развития отрасли необходимо приложить много усилий в решении огромного количества проблем: низкие скорости ветра на большей части территории, санкционное давление, дефицит кадров, финансовые трудности. Действующий механизм поддержки уже запустил маховик инвестиций, а приход в отрасль такой структуры, как «Росатом», обеспечил масштабирование и системный подход к локализации. Однако без фундаментальной научной базы и притока молодых квалифицированных кадров даже самые амбициозные проекты рискуют остаться никогда не реализованными. Поэтому ключевым итогом текущего этапа должно стать формирование целостной экосистемы: от вузовских лабораторий, где рождаются новые инженерные идеи, до заводов, выпускающих готовые установки, способные работать в любом регионе страны на максимальной мощности. Только такая система позволит не догонять другие страны, а формировать собственный технологический ландшафт в мировой ветроэнергетике.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Renewable Capacity Highlights 2025 / International Renewable Energy Agency. – URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA\\_DAT\\_RE\\_Capacity\\_Highlights\\_2025.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Highlights_2025.pdf) (дата обращения: 04.03.2026).
2. Долгова, Ю. Куда дует ветер / Ю. Долгова, Г. Назаров // Вестник Атомпрома. – 2023. – №3. – URL: [https://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2023/04/VA3\\_23\\_spread.pdf](https://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2023/04/VA3_23_spread.pdf) (дата обращения: 04.03.2026).
3. Серебряков, Р. А. Современное состояние, проблемы и перспективы развития ветроэнергетики / Р. А. Серебряков, С. С. Доржиев, Е. Г. Базарова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 10-3. – С. 13-20.
4. Денисов, Р. С. Ветроэнергетика в России: возможности, барьеры и перспективы развития / Р. С. Денисов, В. В. Елистратов, Ш. Гзенгер // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 17-27.
5. Амадзиева, Н. А. Анализ состояния развития мирового рынка возобновляемой энергетики / Н. А. Амадзиева // Региональные проблемы преобразования экономики. – 2022. – № 11(145). – С. 20-30.

## REFERENCES

1. Renewable Capacity Highlights 2025 / International Renewable Energy Agency. – URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA\\_DAT\\_RE\\_Capacity\\_Highlights\\_2025.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Highlights_2025.pdf) (date of access: 04.03.2026).
2. Dolgova, Y. Where the wind blows / Y. Dolgova, G. Nazarov // Bulletin of Atomprom magazine. – 2023. – No. 3. – URL: [https://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2023/04/VA3\\_23\\_spread.pdf](https://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2023/04/VA3_23_spread.pdf) (date of access: 04.03.2026).
3. Serebryakov, R. A. The current state, problems and prospects of development of wind energy / R.A. Serebryakov, S.S. Dorjev, E.G. Bazarova // Actual problems of humanitarian and natural sciences. – 2016. – No. 10-3. – P. 13-20.
4. Denisov, R. S. Wind energy in Russia: opportunities, barriers and development prospects / R. S. Denisov, V. V. Elistratov, S. Gsaenger // Scientific and Technical Bulletin of SPbPU. Natural Sciences and Engineering. – 2017. – Vol. 23, No. 2. – P. 17-27.
5. Amadzieva, N.A. Analysis of the state of development of the global renewable energy market / N. A. Amadzieva // Regional problems of economic transformation. – 2022. – №11 (145). – P. 20-30.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ КАК ИСТОЧНИКА БИОГАЗА

### USE OF VARIOUS AGRICULTURAL WASTES AS BIOGAS SOURCES

**Ерофеев М.С.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Erofeev M.S.**, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Солженикин П.А.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Solzhenikin P.A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Портнов В.В.**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплоэнергетики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Portnov V.V.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Дубанин В.Ю.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Dubanin V.U.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема утилизации сельскохозяйственных отходов и их переработки в биогаз как перспективное направление энергетики. Анализируются основные типы отходов – животноводческие стоки и растительные остатки, их потенциал и ограничения при анаэробном сбраживании. Особое внимание уделяется результатам совместного сбраживания (ко-ферментация), которое позволяет преодолеть недостатки моно-переработки и значительно повысить выход биогаза. Обсуждаются факторы, влияющие на эффективность процесса, и перспективы внедрения биогазовых технологий в контексте циркулярной экономики.

**Ключевые слова:** биогаз, сельскохозяйственные отходы, анаэробное сбраживание, ко-ферментация, метан, возобновляемая энергия, органические удобрения.

**Abstract.** The article considers the problem of utilization of agricultural waste and their processing into biogas as a promising direction of bioenergy. The main types of waste are analyzed - livestock runoff and plant residues, their potential and limitations during anaerobic fermentation. Particular attention is paid to the results of co-fermentation (co-fermentation), which allows you to overcome the disadvantages of mono-processing and significantly increase the yield of biogas. Factors affecting the efficiency of the process and the prospects for introducing biogas technologies in the context of a circular economy are discussed.

**Keywords:** biogas, agricultural waste, anaerobic digestion, co-digestion, methane, renewable energy, organic fertilizers.

Современное сельское хозяйство сталкивается с серьезной экологической проблемой – непрерывным накоплением больших объемов органических отходов. Животноводческие комплексы производят миллионы тонн навоза и помета, а растениеводство оставляет после себя солому, ботву, стебли и другие остатки. Традиционные методы обращения с этими отходами – открытое складирование, вывоз на поля или сжигание – создают ряд проблем.

При хранении навоза в отстойниках происходит разложение органического вещества с выделением метана и закиси азота, которые обладают высоким потенциалом глобального потепления, ведь метан и закись азота являются сильными парниковыми газами. Исследования показывают, что при хранении одной тонны навоза образуется от 16 до 84 кг CO<sub>2</sub>-эквивалента метана. Сжигание растительных остатков на полях приводит к загрязнению атмосферы и потере ценного органического вещества. Кроме того, необработанные отходы могут стать источником загрязнения почв и грунтовых вод, а также распространения патогенных микроорганизмов [1].

Также существует проблема энергообеспечения сельскохозяйственных предприятий, особенно в удаленных районах, где доступ к централизованным энергосетям ограничен. Ископаемое топливо, составляющее более 80 % мирового энергопотребления, не только истощается, но и является основным источником парниковых газов.

Решением этих взаимосвязанных проблем могут служить биогазовые технологии, основанные на процессе анаэробного сбраживания. Эта технология позволяет не только обезвредить отходы и снизить выбросы парниковых газов, но и получить ценный энергоноситель – биогаз (смесь метана и углекислого газа), а также высококачественные органические удобрения. Настоящая работа посвящена анализу потенциала различных сельскохозяйственных отходов как сырья для производства биогаза и обсуждению факторов, определяющих эффективность этого процесса [2, 3].

Сельскохозяйственные отходы можно разделить на две основные категории: отходы животноводства (навоз, помет) и отходы растениеводства (солома, стебли, шелуха, ботва и др.). Их свойства существенно различаются, что определяет особенности переработки.

Животноводческие отходы имеют высокое содержание азота и влаги, а также богатой микробной флорой, что делает их хорошей основой для процесса сбраживания. Однако выход биогаза с единицы массы варьируется в зависимости от вида животных. Свиной навоз демонстрирует потенциал 400-500 мл метана на грамм летучих твердых веществ (VS), тогда как для крупного рогатого скота этот показатель составляет 300-400 мл/г VS. Птичий помет отличается высоким содержанием азота, что может привести к ингибированию процесса аммиаком.

Растительные отходы (солома зерновых, стебли кукурузы, подсолнечника, рисовая солома, багасса сахарного тростника) имеют высокое содержание сухого вещества и углерода, но их основным ограничением является наличие лигнина. Лигнин образует прочный комплекс с целлюлозой и гемицеллюлозой, делая их труднодоступными для микроорганизмов. Типичный состав растительных остатков включает 35-55 % целлюлозы, 25-40 %

гемицеллюлозы и 15-25 % лигнина. Чем выше содержание лигнина, тем ниже биодоступность субстрата. Например, рисовая солома, несмотря на огромные объёмы накопления (только в Индии ежегодно образуется около 43,85 млн. тонн избыточной рисовой соломы), без предварительной обработки перерабатывается с низкой эффективностью.

Переработка какого-либо одного вида отходов (моно-дигестия) часто сталкивается с трудностями. Животноводческие стоки, особенно в жидком виде, имеют неоптимальное соотношение углерода к азоту (C:N). Для эффективной работы метаногенных бактерий оптимальным считается соотношение C:N около 20-30:1. В навозе оно часто ниже, что приводит к накоплению аммиака, токсичного для микрофлоры.

Растительные остатки, напротив, имеют высокое содержание углерода и дефицит азота, а их медленный гидролиз из-за лигнина лимитирует общую скорость процесса. Исследования показывают, что использование только растительных отходов даёт ограниченный выход метана из-за их устойчивости к разложению.

Решением является совместное сбраживание (ко-ферментация) различных типов отходов. Смешивание богатых азотом отходов животноводства с богатыми углеродом растительными остатками позволяет достичь оптимального баланса питательных веществ и снизить риск ингибирования.

Анализ показывает, что для эффективной работы метаногенных бактерий критически важно содержание сухих веществ выше 15 %. pH среды также играет важную роль: в начале процесса возможно закисление (до 4,2), но в стабильно работающем реакторе pH должен поддерживаться в нейтральном диапазоне (6,8-7,5), что достигается благодаря буферным свойствам смеси и активности микроорганизмов.

Для труднодоступных лигноцеллюлозных субстратов, таких как солома или стебли кукурузы, ключевое значение имеет стадия предварительной обработки. Она может быть механической, термической, химической или биологической и направлена на разрушение комплекса лигнина и увеличение доступности целлюлозы для ферментов. Обзор индийского рынка показывает, что применение различных методов предварительной обработки может увеличить выход биогаза на 33-37 %. Добавление углеродных материалов, таких как биочар, также способно повысить продуктивность на 40-50 %, улучшая микробную активность и снижая концентрацию ингибиторов.

Большинство промышленных установок работают в мезофильном (30-40 °C) или термофильном (50-55 °C) режиме. Однако для регионов с умеренным климатом перспективной является разработка низкотемпературного сбраживания (15-25 °C) с использованием психрофильных микроорганизмов. Это позволяет снизить энергозатраты на подогрев реакторов и уменьшить образование летучих жирных кислот и аммиака, делая процесс более стабильным.

Энергетический потенциал сельскохозяйственных отходов огромен. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), на долю развивающихся стран с развитым аграрным сектором (Индия, Бразилия, Китай) приходится 80 % глобального потенциала биогаза. В Индии только из отходов растениеводства потенциально можно производить до 20 млн. метрических тонн компримированного биогаза (CBG) в год, который по своим характеристикам сопоставим с природным газом.

Экологические преимущества включают не только сокращение выбросов метана от разлагающихся отходов. Образующийся в процессе сбраживания дигестат является ценным органическим удобрением. В отличие от сырого навоза, дигестат имеет стабильный состав, практически не имеет запаха и не содержит семян сорняков и патогенов. Исследования показывают возможность извлечения из дигестата более 95 % азота в форме струвита – медленнодействующего удобрения. Использование дигестата позволяет снизить потребность в дорогостоящих и энергоёмких синтетических удобрениях, замыкая цикл nutrients (питательных веществ) в сельском хозяйстве.

Экономическая эффективность биогазовых проектов зависит от масштаба и логистики. Для влажного навоза экономически оправданный радиус транспортировки до централизованного реактора составляет около 10 км. Для более сухих растительных остатков этот радиус может достигать 50 км. Эффект масштаба существенен: производство на крупных установках может быть на 40 % дешевле, чем на малых. Около 80 % капитальных затрат приходится на оборудование, а в операционных затратах основную долю (26 %) составляет стоимость сырья [4].

Таким образом, можно сделать вывод, что технология анаэробной переработки сельскохозяйственных отходов сегодня является вполне доступным и отработанным инструментом. Использование биогаза дает возможность сократить потребление ископаемых видов топлива и тем самым продления срока их исчерпания. Важным фактом является необходимость отказа от переработки какого-то одного вида сырья в пользу смешивания различных типов отходов: коллективное сбраживание навоза с растительными остатками создает идеальный баланс веществ, повышает стабильность процесса и кратно увеличивает выход метана. Основные трудности при внедрении таких проектов связаны с организацией сбора и доставки сырья. Также трудности вызывает необходимость предварительной обработки грубых растительных материалов (например, соломы), чтобы сделать их доступными для бактерий. Тем не менее, встраивание биогазовых установок в инфраструктуру сельского хозяйства соответствует принципам циркулярной экономики, превращая отходы из источника загрязнения в ценный ресурс для энергии и удобрений. Дальнейшее совершенствование процессов, включая разработку методов низкотемпературного сбраживания и биологического усиления, откроет путь к более эффективному и повсеместному использованию этой технологии [5].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рециклинг отходов в агропромышленном комплексе / РУВИКИ. – URL: [https://ru.ruwiki.ru/wiki/Рециклинг\\_отходов\\_в\\_агропромышленном\\_комплексе](https://ru.ruwiki.ru/wiki/Рециклинг_отходов_в_агропромышленном_комплексе) (дата обращения: 7.03.2026).
2. Велькин, В. И. Возобновляемая энергетика и энергосбережение : учебник для студентов вуза / В. И. Велькин, Я. М. Щелоков, С. Е. Щеклеин ; под общей редакцией В. И. Велькина ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2020. – 312 с.

3. Гайфуллин, И. Х. Утилизация органических отходов сельского хозяйства с получением биоудобрений и биогаза / И. Х. Гайфуллин, З. М. Халиуллина, Б. Г. Зиганшин // Агробиотехнологии и цифровое земледелие. – 2025. – №. 1. – С. 16-23.

4. Мамонтов, А. Ю. Унификация основных критериев и экономическая оценка биоэнергетических комплексов. Проблемы и решения / А. Ю. Мамонтов // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 9(108). – С. 108-112.

5. СПбПУ. Технология полной переработки биомассы в биотопливо / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – 2025. – URL: [https://research.spbstu.ru/news/tehnologiya\\_polnoy\\_pererabotki\\_biomassy\\_v\\_biotoplivo/](https://research.spbstu.ru/news/tehnologiya_polnoy_pererabotki_biomassy_v_biotoplivo/) (дата обращения: 12.03.2026).

## REFERENCES

1. Recycling of waste in the agro-industrial complex/RUVIKI. - URL: [https://ru.ruwiki.ru/wiki/Рециклинг\\_отходов\\_в\\_агропромышленном\\_комплексе](https://ru.ruwiki.ru/wiki/Рециклинг_отходов_в_агропромышленном_комплексе) (date of access: 7.03.2026).

2. Velkin, V. I. Renewable energy and energy conservation: textbook for university students / V. I. Velkin, Ya. M. Shchelokov, S. E. Scheklein ; Edited by V. I. Velkin; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin. – Yekaterinburg : Ural University Publishing House, 2020. – 312 p.

3. Gaifullin, I. Kh. Utilization of organic agricultural waste to produce biofertilizers and biogas / I. Kh. Gaifullin, Z. M. Khalullina, and B. G. Ziganshin // Agrobiotechnology and Digital Agriculture. – 2025. – No. 1. – P. 16-23.

4. Mamontov, A. Yu. Unification of the basic criteria and the economic assessment of the bioenergy complexes. Problems and solutions / A. Yu. Mamontov // Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. – 2015. – № 9(108). – P. 108-112.

5. SPbPU. Technology for the complete processing of biomass into biofuels / Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. – 2025. – URL: [https://research.spbstu.ru/news/tehnologiya\\_polnoy\\_pererabotki\\_biomassy\\_v\\_biotoplivo/](https://research.spbstu.ru/news/tehnologiya_polnoy_pererabotki_biomassy_v_biotoplivo/) (date of access: 12.03.2026).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЯМОЙ И КОСВЕННОЙ ДУГИ

SIMULATION OF THERMAL PROCESSES DURING PLASMA COATING APPLICATION  
USING DIRECT AND INDIRECT ARC

**Кадырметов А.М.**, доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Kadyrmetov A.M.**, DrSc in Technical Sciences, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Бухтояров В.Н.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Bukhtoyarov V.N.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Иванников В.А.**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Ivannikov V.A.**, DrSc in Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Голев А.Д.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Golev A.D.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** Состояние плазменного покрытия зависит от правильно подобранных технологических режимов. Они в свою очередь определяют температурное поле, возникающее в детали и покрытии. Прогнозировать состояние покрытия или детали можно моделируя температурные режимы процесса плазменной обработки. Статья посвящена математическому моделированию тепловых процессов, в которых в качестве источника тепла выступает одновременно и косвенная, и прямая дуга. Проанализировано влияние технологических режимов на температурные параметры процесса плазменной обработки детали при их изменении.

**Ключевые слова:** температурное поле детали, плазменная обработка, оплавление покрытия, физико-механические свойства детали и покрытия.

**Abstract.** The condition of a plasma coating depends on the correct selection of process conditions. These, in turn, determine the temperature field generated in the part and coating. The condition of a coating or part can be predicted by modeling the temperature conditions of the plasma

treatment process. This article examines the mathematical modeling of thermal processes in which both an indirect and direct arc act as a heat source. The influence of process conditions on the temperature parameters of the plasma treatment process is analyzed as they change.

**Keywords:** temperature field of the part, plasma treatment, melting of the coating, physical and mechanical properties of the part and coating.

Современное машиностроительное производство не может существовать без использования сварочных процессов. Большинство ответственных сборочных единиц, такие как детали кузов, различного типа косынки и основания не могут быть соединены без сварки. Если внимательнее изучить сборочные чертежи автомобильного производства, то часто можно встретить сварочные швы. В некоторых случаях применяют плазменную наплавку или резку. Все это в значительной степени может перегреть деталь и вызвать нежелательные структурные изменения, а в худшем случае термические напряжения.

Прогнозирование физико-механических свойств покрытий, формируемых при плазменном нанесении, достигается за счет оптимизации режимов. Одним из основных условий качественного покрытия является проплавление покрытия вместе с переходной зоной «покрытие-основание».

Наличие высокой температуры (выше температуры плавления) вызывает повышение хрупкости, снижение основных физико-механических свойств, в том числе это приводит к снижению прочности основного металла и деформации детали из-за термических напряжений. Формирование покрытия на неправильно подобранных режимах может вызвать термические напряжения и в покрытии. Сжимающие напряжения благоприятно скажутся на покрытии, а вот растягивающие могут вызвать растрескивание и в дальнейшем его отслаивание [1].

Если использовать плазменные способы обработки поверхности, то в большинстве случаев происходит перегрев основного материала и покрытия. При нанесении покрытий плазменным способом деталь может разогреваться до 373-573 К и более. Чтобы избежать нежелательных изменений структуры материала основы, в процессе нанесения необходимо предусмотреть ее охлаждение. Его использование не только способствует сохранению свойств основного металла, но и благоприятно влияет на само покрытие, вызывая уменьшение остаточных напряжений в нем [2]. Еще одним из положительных моментов использования охлаждения является возможность увеличить толщину покрытия на 20-30 % за счет снижения термических напряжений во всей системе «деталь-покрытие».

Все выше изложенное говорит о важности математического моделирования тепловых процессов при плазменной обработке материалов.

Рассмотрим математическую задачу определения температурного поля в детали типа «цилиндр», с размерами – радиусом  $R$  и длиной  $l$ . В качестве источника тепла выступают две составляющие – косвенная и прямая электрическая дуги характерные для плазменного процесса. Тепловая мощность косвенной дуги равна –  $q_k$  и выносной –  $q_e$ . При этом заданный источник тепла движется по винтовой линии со скоростью  $V = const$  и шагом винтовой линии  $H$ .

Составление математических зависимостей температурного поля при плазменной обработке требует следующих условий и допущений: 1) распределение тепла в детали подчиняется законам Фурье; 2) привязка источника тепла осуществляется по центру пятна

контакта; 3) в процессе нанесения покрытия, структурные и фазовые изменения не влияют на температурное поле; 4) теплофизические свойства детали не влияют на температурное поле; 5) тепловой источник ограничен в объеме на поверхности детали типа «цилиндр».

Математическая модель обмена теплом при обработке поверхностей концентрированным источником тепла, в рассматриваемом случае будет базироваться на теории сварочных процессов, предложенной учеными Н. Н. Рыкалиным [3] и модели Махненко [4]. Таким образом будет предложена схема движения мощного быстро движущегося источника тепла. Это предположение обосновано тем, что во многих литературных источниках утверждают, что при сварочных процессах применимы высокие скорости перемещения источников тепла (плазматрон, горелка и т.д.) [5]. На поверхности цилиндра сразу же за тепловым источником на заданном расстоянии с начала момента воздействия тепло распространяется перпендикулярно оси симметрии цилиндра.

В представленных уравнениях температурное поле  $T$  будет складываться из трех элементов:  $T_{\Sigma}$  – температурное поле на расстоянии от источника температуры;  $T_{n\theta}$  – поле вблизи теплового источника;  $T_0$  – температура поверхности на начальный период времени

$$T(r, z, \Theta, t) = T_{\Sigma}(r, z, \Theta, t) + T_{n\theta} + T_0, \quad (1)$$

где  $r, z, \Theta$  – координаты расположения источника тепла в цилиндрической детали;  $t$  – время нанесения покрытия.

Представив данную зависимость в безразмерных параметрах, можно увидеть следующие уравнения:

$$\mathcal{G}(\rho, \xi, N) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=0}^N \frac{\Phi_i(\rho, \tau_i)}{\sqrt{\tau_i}} \exp\left[-\frac{(\xi - \xi_i)^2}{4\tau_i}\right], \quad (2)$$

где

$$\mathcal{G}(\rho, \xi, N) = \frac{T(r, z, \Theta, t) - T_0}{q_n} \cdot R^2 c_{\gamma}; \quad \xi = \frac{z}{R}; \quad \tau_i = \frac{at_i}{R^2};$$

член суммы  $i = 0$  определяет величину приращения температуры от последнего витка ( $T_{n\theta}$ ), а сумма членов  $i = 1, 2, \dots, N$  – влияние предшествующих витков, т.е. величину  $T_{\Sigma}$ ;  $R$  – радиус цилиндра;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $q_n = q/Vz$  – погонная энергия;  $q$  – тепловая мощность плазматрона;  $\Phi_i(\rho, \tau_i)$  – функция, характеризующая процесс распространения тепла по радиусу цилиндра.

Для расчета температурного поля теплового воздействия с достаточной для практических расчетов точностью, ее можно представить в виде:

$$\mathcal{G}_{\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{\pi \tau_*}} \sum_{i=1}^N \frac{\exp\left[-\frac{\xi_i^2}{4\tau_*}\right]}{\sqrt{i}}, \quad (3)$$

где  $\mathcal{G}_{\Sigma} = \frac{T_{\Sigma}}{q_n} R^2 c_{\gamma}$ ;  $\xi = H/R$  – относительный шаг витка напыления;  $\tau_* = at_*/R^2$  – безразмерный критерий времени одного оборота источника.

Влияние последнего незаконченного витка может быть оценено по схеме мощного быстродвижущегося источника на поверхности полубесконечного тела с помощью зависимости:

$$\vartheta_{n\bar{c}} = \frac{1}{2\pi\tau} \exp\left[-\frac{h^{*2}}{4\tau}\right] \bar{m}^* , \quad (4)$$

где  $\vartheta_{n\bar{c}}$  – безразмерная температура последнего неполного витка,  $\vartheta_{n\bar{c}} = \frac{T_{n\bar{c}}}{q_n} R^2 c_\gamma$ ;  $T_{n\bar{c}}$  – его размерная температура;  $h^*$  – относительное расстояние исследуемой точки от поверхности цилиндра,  $h^* = h/R$ ;  $\tau$  – безразмерный критерий времени действия источника тепла от последнего незаконченного витка, отсчитываемое с момента пересечения источником полуплоскости, в которой находится исследуемая точка,  $\tau = at/R^2$ ;  $\bar{m}^*$  – поправка на ограниченность сечения цилиндра.

На основе представленной модели были проведены расчеты. Зависимости безразмерной температуры  $\vartheta$  от безразмерного времени витка  $C$  и шага  $\xi$ , а также от количества витков  $n$  представлены на рисунке 1.

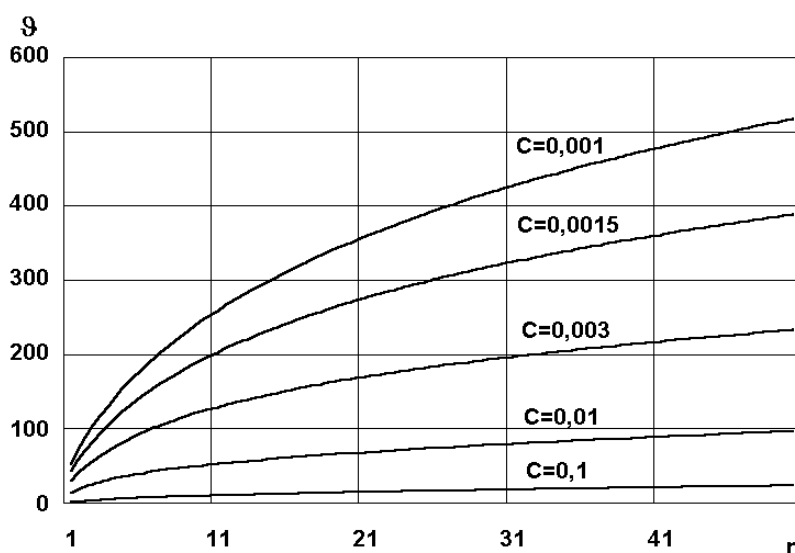


Рисунок 1 – Зависимость безразмерных температуры  $\vartheta$  от времени витка  $C$  и количества витков  $n$  ( $\xi = 0,0002$ )

Расчеты показали, что уравнение зависимости безразмерной температуры  $\vartheta$  от количества витков  $n$  носит возрастающий характер. Возрастание происходит со значений  $n$  больше 1000 и значении  $\xi$  меньше 0,02, при количестве витков больше 20 и  $\xi$  больше 0,025 или значении  $C$  приблизительно равным 0,1.

Характер изменения безразмерной температуры  $\vartheta$  от комплекса  $C$  (рисунок 2) представляет собой убывающую зависимость при  $\xi$  меньше или равно 0,025.

Характер изменения безразмерной температуры  $\vartheta$  от шага витка  $\xi$  можно увидеть ниже (рисунки 3, 4). Зависимость имеет не постоянный характер и определяется численными величинами времени витка  $C$ . При  $C$  меньше или равным 0,001 кривые этого уравнения имеют

убывающий характер, при  $C$  находящемся в пределах от 0,1 до 0,001 – выпуклый убывающий, а при  $C$  равной 0,1 ... 1 температура  $\vartheta$  от шага  $\xi$  фактически постоянна.

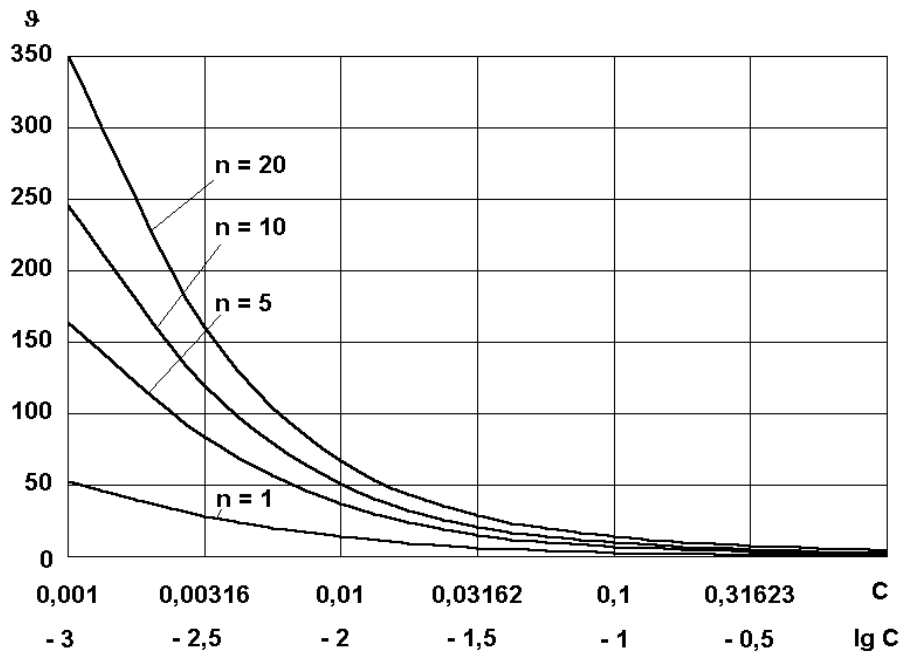


Рисунок 2 – Зависимость безразмерных температуры  $\vartheta$  от времени витка  $C$  и количества шагов  $n$  ( $\xi = 0,0002$ )

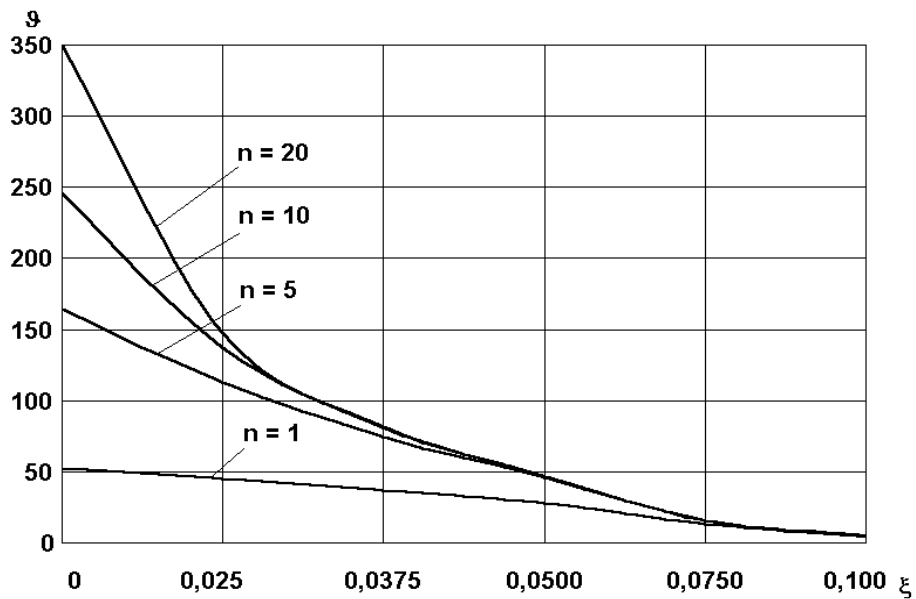


Рисунок 3 – Зависимость безразмерных температуры  $\vartheta$  от шага витка  $\xi$  и количества шагов  $n$  ( $C = 0,001$ )

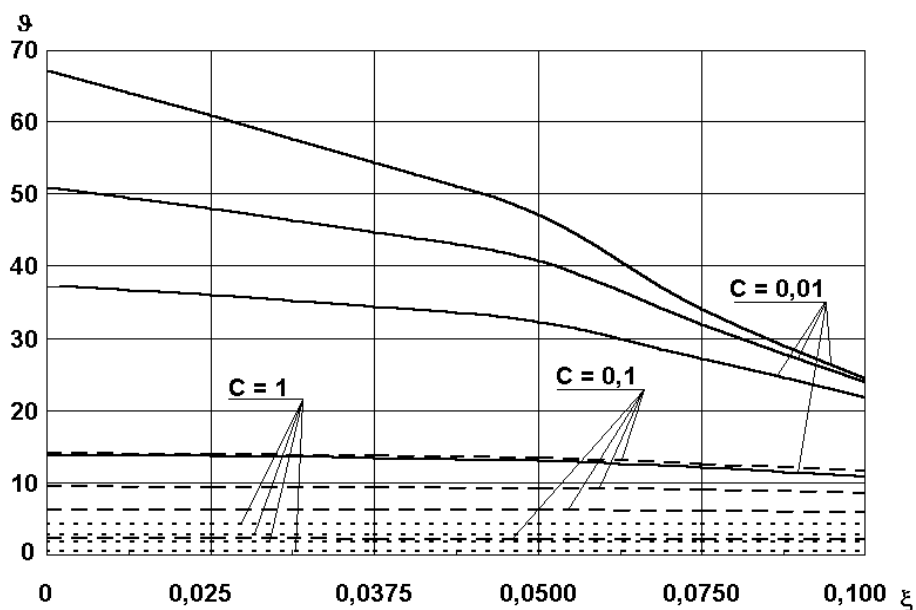


Рисунок 4 – Зависимость безразмерных температуры  $\theta$  от шага витка  $\xi$  и количества шагов  $n$  при различных времени витка  $C$

Зная, какие структурные изменения происходят при той или иной температуре в покрытии, из безразмерной температуры мы выражаем тепловую мощность плазматрона, которая обеспечивала бы необходимый температурный режим.

Предлагаемые математические зависимости позволяют оптимизировать процесс плазменного нанесения покрытия, предупреждая перегрев основного материала, а соответственно его термические напряжения, проплавления покрытия до основания, создавая его нужные физико-механические свойства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадырметов, А. М. Теоретические основы и технологическое обеспечение качества плазменного нанесения и упрочнения покрытий модуляцией электрических параметров : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.07, 05.02. 08 / А. М. Кадырметов; ВГЛТА. – Воронеж, 2013. – 32 с.
2. Соснин, Н. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. – Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2008. – 406 с.
3. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – Москва : Машгиз, 1951. – 296 с.
4. Махненко. В. И. Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей круговых цилиндров / В. И. Махненко. – Киев : Наук. думка, 1976. – 159 с.
5. Бухтояров, В. Н. Технология восстановления цилиндрических поверхностей валов плазменным напылением с одновременным оплавлением выносной модулируемой дугой (на примере коленчатого вала) : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / В. Н. Бухтояров; Воронежская гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 2003. – 16 с.

## REFERENCES

1. Kadyrmetov, A. M. Theoretical Foundations and Technological Support of the Quality of Plasma Application and Hardening of Coatings by Modulation of Electrical Parameters : Abstract of a PhD thesis ... Doctor of Engineering Sciences: 05.02.07, 05.02. 08 / A. M. Kadyrmetov; VGLTA. – Voronezh, 2013. – 32 p.
2. Sosnin, N. A. Plasma technologies. A guide for engineers / N. A. Sosnin, S. A. Ermakov, P. A. Topolyansky. – St. Petersburg : Publishing House of the Polytechnic University, 2008. – 406 p.
3. Rykalin, N. N. Calculations of thermal processes during welding / N. N. Rykalin. – Moscow : Mashgiz, 1951. – 296 p.
4. Makhnenko, V. I. Thermal processes in mechanized surfacing of circular cylinder parts / V. I. Makhnenko. – Kyiv : Nauk. dumka, 1976. – 159 p.
5. Bukhtoyarov, V. N. Technology of restoration of cylindrical surfaces of shafts by plasma spraying with simultaneous melting by an external modulated arc (using a crankshaft as an example) : Abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation: 05.03.01 / V. N. Bukhtoyarov; Voronezh State Forest Engineering Academy. – Voronezh, 2003. – 16 p.

## ОЦЕНКА РЕЗЕРВОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ И ВЫСВОБОЖДЕНИЯ МОЩНОСТИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

### ASSESSMENT OF BUILDING ENERGY EFFICIENCY RESERVES AND THERMAL NETWORK CAPACITY RELEASE

**Коновалов Д.А.**, доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия; профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

**Konovalev D.A.**, DrSc in Technical Sciences, Docent, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

**Гашо Е.Г.**, доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

**Gasho E.G.**, DrSc in Technical Sciences, Docent, Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

**Коновалова М.Д.**, студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

**Konovaleva M.D.**, Student, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

**Орехова М.Т.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Orekhova M.T.**, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Маслов К.А.**, студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

**Maslov K.A.**, Student, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

**Аннотация.** Предложено рассматривать энергоэффективность зданий – как ключевой показатель не только годовой экономии ресурсов, но и экономии (высвобождения) тепловой мощности источников, их надежности при прохождении пиков тепловой нагрузки, а также долговечности зданий в условиях климатических изменений в крупных городах и мегаполисах. Применение современных теплоизоляционных материалов при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте многоквартирных жилых домов позволяет не только повысить энергоэффективность последних, но и сформировать резервы высвобождения мощности. Определены и доказаны реальные резервы повышения энергетической эффективности, высвобождения тепловой мощности источников в результате проведения комплекса мер по энергосбережению в зданиях разного типа.

**Ключевые слова:** эффекты энергосберегающих мероприятий, изменение климата, термическое сопротивление наружных ограждающих конструкций, резервы долговечности.

**Abstract.** It is proposed to consider the energy efficiency of buildings as a key indicator not only of annual resource savings but also of the savings (release) in thermal power from sources, their

reliability during peak heat loads, and the durability of buildings under climate change in large cities and metropolitan areas. The use of modern thermal insulation materials in the construction, renovation, and capital repairs of multi-family residential buildings not only improves their energy efficiency but also creates reserves for releasing power. Real reserves for increasing energy efficiency and releasing thermal power from sources through the implementation of a range of energy conservation measures in various building types have been identified and proven.

**Keywords:** effects of energy-saving measures, climate change, thermal resistance of external enclosing structures, durability reserves.

Современные города и мегаполисы на протяжении многих лет остаются самыми быстрорастущими в РФ как по численности населения, так и по объему ввода нового жилья. Активное строительство новых жилых и коммерческих объектов, а также реализация программ реновации и капитального ремонта увеличивают потребность в электрической и тепловой энергии в спальных районах города [1]. С ростом централизации теплоснабжения потребителей и плотности городской застройки, подключение новых потребителей к тепловым сетям становится проблематичным из-за отсутствия резервов пропускной способности. Отдельного внимания заслуживает состояние объектов генерации энергии и тепловых сетей изменения нормативов расчетных параметров климатических температур [2].

Так, например, доля ветхих тепловых и паровых сетей в г. Москве наименьшая среди регионов Центрального федерального округа на конец 2024 года и составила 1 %. Доля ветхих тепловых и паровых сетей в Московской области выше среднего среди регионов Центрального федерального округа на конец 2024 года и составила 29 %. Доля протяженности ветхих тепловых и паровых сетей в регионах Центрального федерального округа на конец 2023 и 2024 годов приведена на рисунке 1.

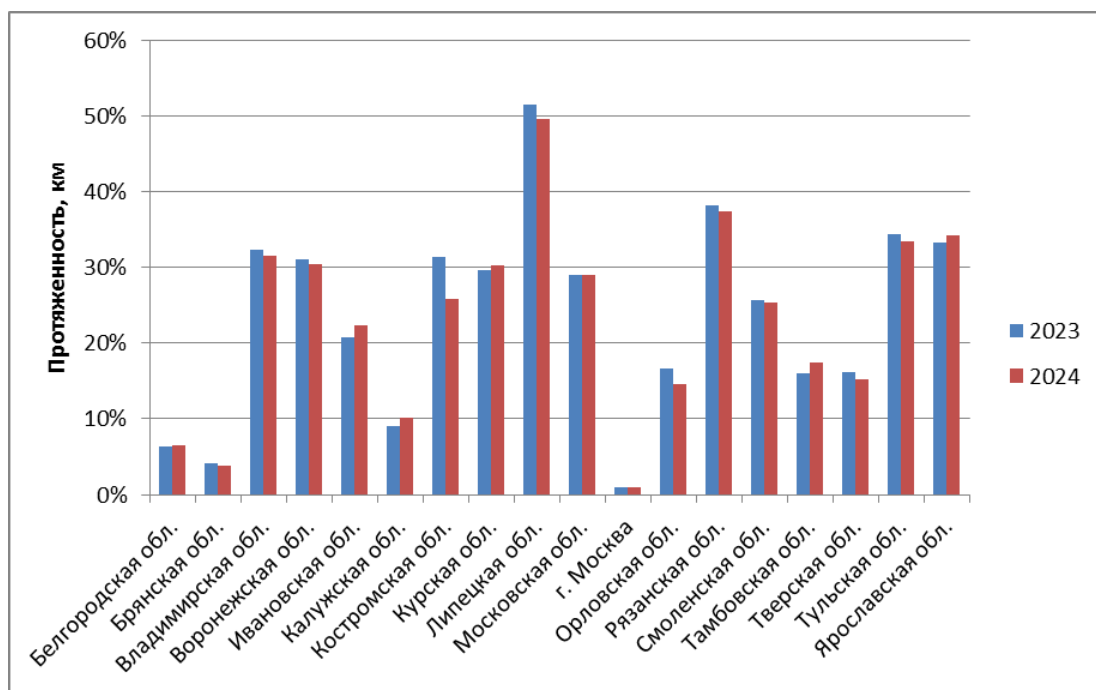


Рисунок 1 – Доля протяженности ветхих тепловых и паровых сетей в регионах Центрального федерального округа на конец 2024 года

При этом в ходе износа объектов энергетики и тепловых сетей на протяжении многих лет при неизменном температурном графике 150/70 °С существенно менялась температура срезки в подающем трубопроводе [1]. Например, с 90-х годов прошлого века для ухода от контроля технического состояния тепловых сетей в г. Москве была установлена температурная срезка на уровне 115 °С. В отопительный период 2005-2006 годов температурная срезка была изменена на уровень – 130 °С, что позволило повысить отпуск тепловой энергии потребителям г. Москвы от действующих теплоисточников. В отопительный период с 2020 по 2024 годы с температурной срезкой в подающем трубопроводе – 130 °С. Постепенный рост потребления тепловой энергии в г. Москве постепенно исчерпывает имеющиеся резервы пропускной способности теплосетей. Ситуация в других городах оказывается существенно хуже и требует формирования резервов для обеспечения как безаварийной работы тепловых сетей, так и поддержания микроклимата в зданиях и сооружениях путем повышения их энергоэффективности [3].

Таким образом, с каждым годом города и мегаполисы потребляют все больше и больше энергетических ресурсов для обеспечения своей жизнедеятельности, скорость прироста которых в разы превышает прирост населения города. Наиболее высокий рост потребления энергоресурсов приходится на электрическую мощность. Причиной этого является потребление населением части этой электрической мощности с целью обогрева, для компенсации дефицита тепловой мощности в системе отопления многоквартирных домов.

Для оценки энергоэффективности были выполнены расчеты для зданий различных типов 1950-1990 годов постройки, которые являются преобладающими в крупных городах и мегаполисах [1, 3, 4]. Выполнены расчеты коэффициентов термического сопротивления стен для различных классов зданий. Определялось тепловое состояние несущих наружных охлаждающих конструкций при различных температурах окружающего воздуха, включая неблагоприятные циклы перехода через ноль градусов Цельсия, проводилась оценка возможной конденсации водяных паров на внутренних поверхностях, а также влияние лучистого теплообмена на микроклимат в помещениях [5].

Расчеты были выполнены для следующих объектов.

Серия П-46М (керамзитобетонные бетонные панели). Наружные стены представляют собой однослойные навесные одно и двухмодульные панели из керамзитобетона толщиной 340 мм.

Серия П-14 (силикатный или глиняный кирпич). Представлена 5-этажными домами. Наружные стены домов серии П-14 состоят из кирпича с отделкой. Их толщина составляет 610 мм, из которых 510 мм приходится на кладку.

Серия П-43, П-111 (трехслойная керамзитобетонная панель). Более современной конструкцией панельного домостроения с точки зрения энергоэффективности оказалась серия домов П-43 (П-44), а также новая серия домов П-111.

Результаты расчетов показали, что удельное термическое сопротивление наружных ограждающих конструкций зданий довольно сильно отличается и не соответствует действующим на сегодняшний день нормам. Кроме того, показатель ухудшается с изменением

климатических факторов (переход от условий эксплуатации А – сухой и нормальный климат, к условиям Б – влажный климат). Сравнительный график удельного термического сопротивления различных типов домов представлен на рисунке 2. Отдельного внимания заслуживает размер зоны возможной конденсации водяных паров в наружной ограждающей конструкции (рисунки 3, 4), что связано с переходом к отрицательным температурам, а также частых циклов перехода через ноль градусов Цельсия (заморозки-оттепели). Рост циклов приводит к росту энергопотребления с одновременным снижением долговечности конструкций.

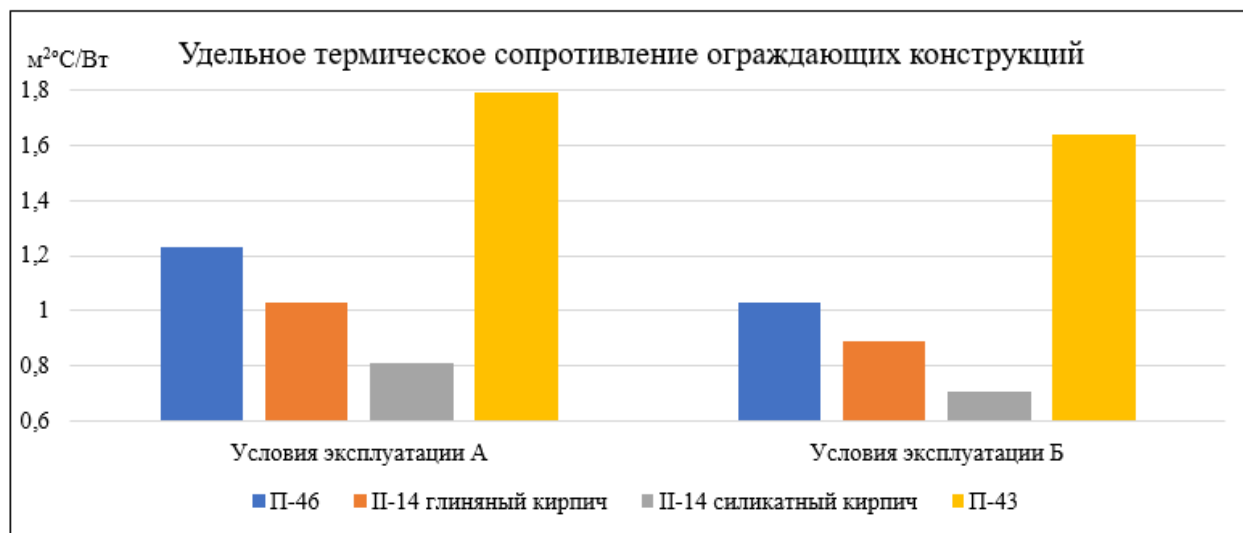


Рисунок 2 – Сравнительный анализ значений удельного термического сопротивления зданий разных серий постройки

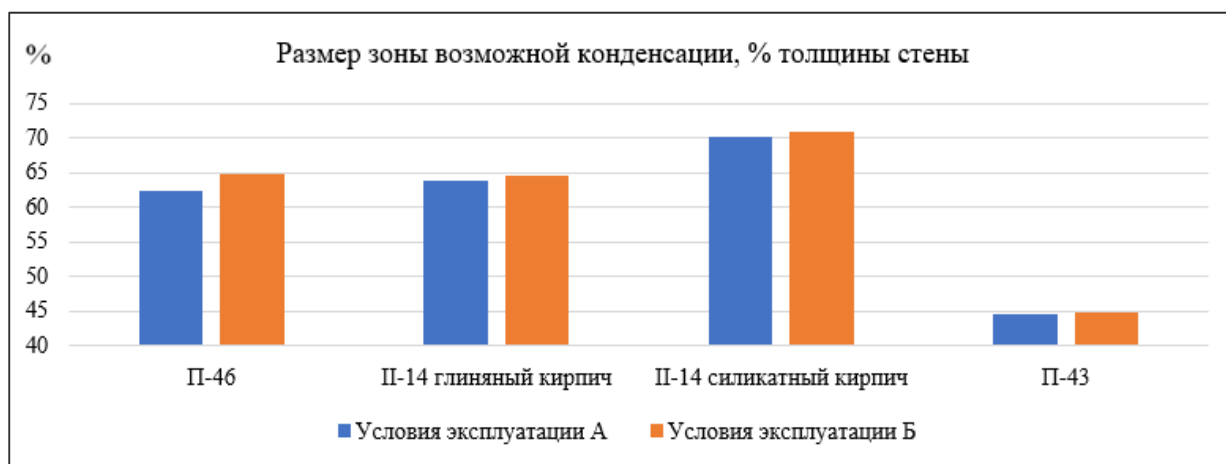


Рисунок 3 – Размер зоны возможной конденсации водяных паров в наружных ограждающих конструкциях при температуре наружного воздуха минус 26 °С

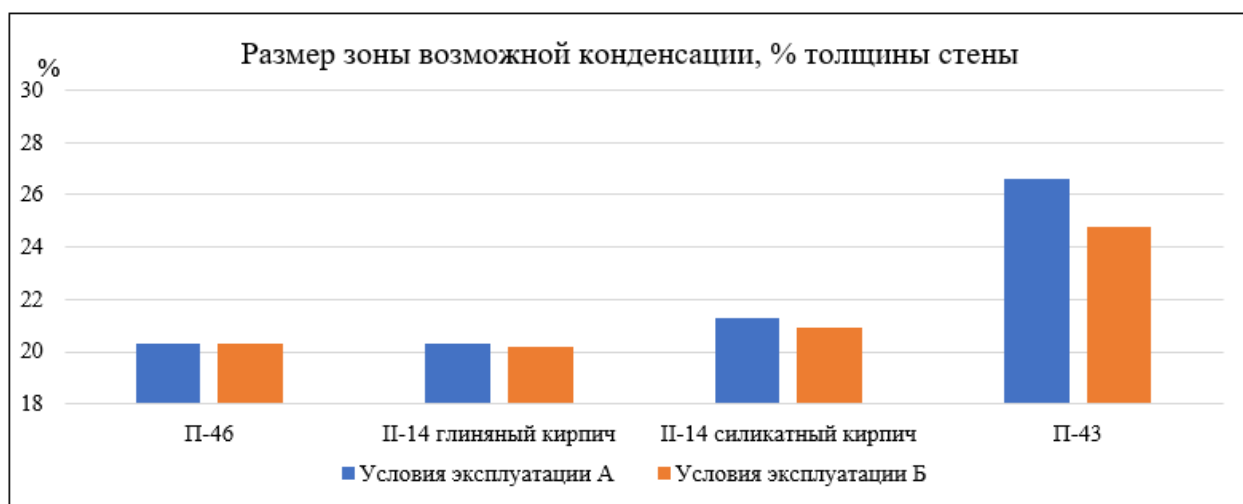


Рисунок 4 – Размер зоны возможной конденсации водяных паров в наружных ограждающих конструкциях при температуре наружного воздуха минус 5 °С

Кроме того, установлено, что для ряда домов (кирпичные дома) в условиях низких расчетных отрицательных температур могут наблюдаться зоны конденсации водяных паров внутри помещений (рисунок 5), приводящие как к образованию плесени и грибка, так и к последующему преждевременному разрушению конструкций.

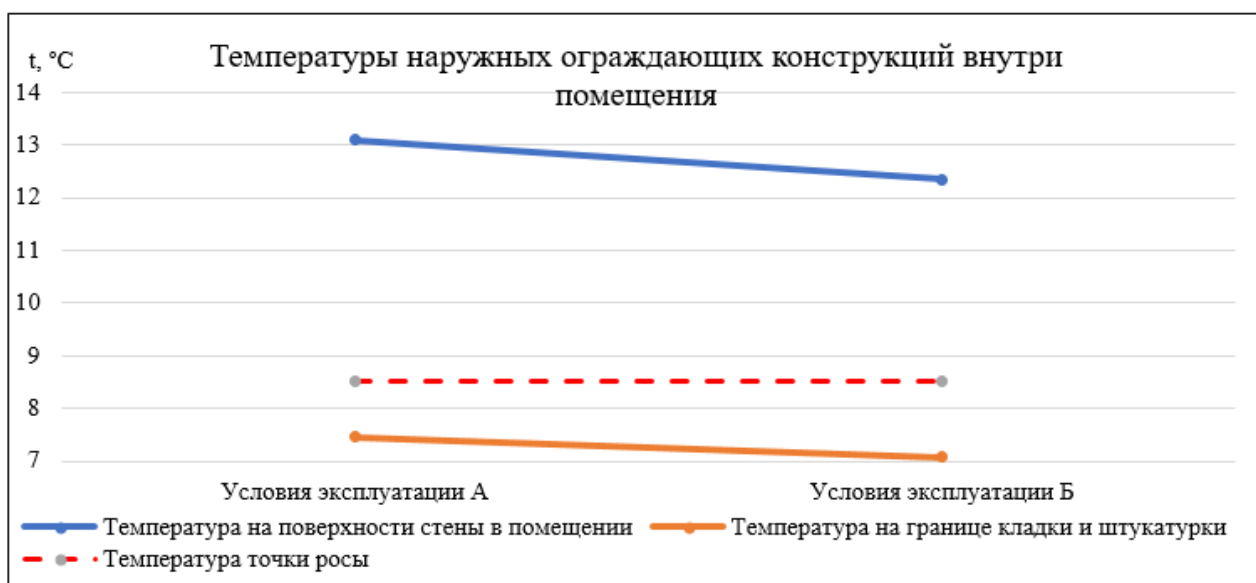


Рисунок 5 – Влияние условий эксплуатации на температуры на поверхностях наружных ограждающих конструкций внутри помещения для домов серии П-14 из глиняного кирпича

Крайне важным фактором ухудшения теплозащитных свойств ограждений в крупных городах и мегаполисах, следует считать растущую влажность и тепловой остров мегаполиса, что приводит вкупе с переходами через ноль градусов Цельсия к заметному снижению термического сопротивления в большинстве эксплуатируемых строительных конструкций

городских зданий. Увеличение влажности, рост циклов переходов температуры наружного воздуха переходов через 0 °С, приводят к дополнительному снижению теплозащитных характеристик МКД относительно проектных на 22-30 % (рисунок 6).

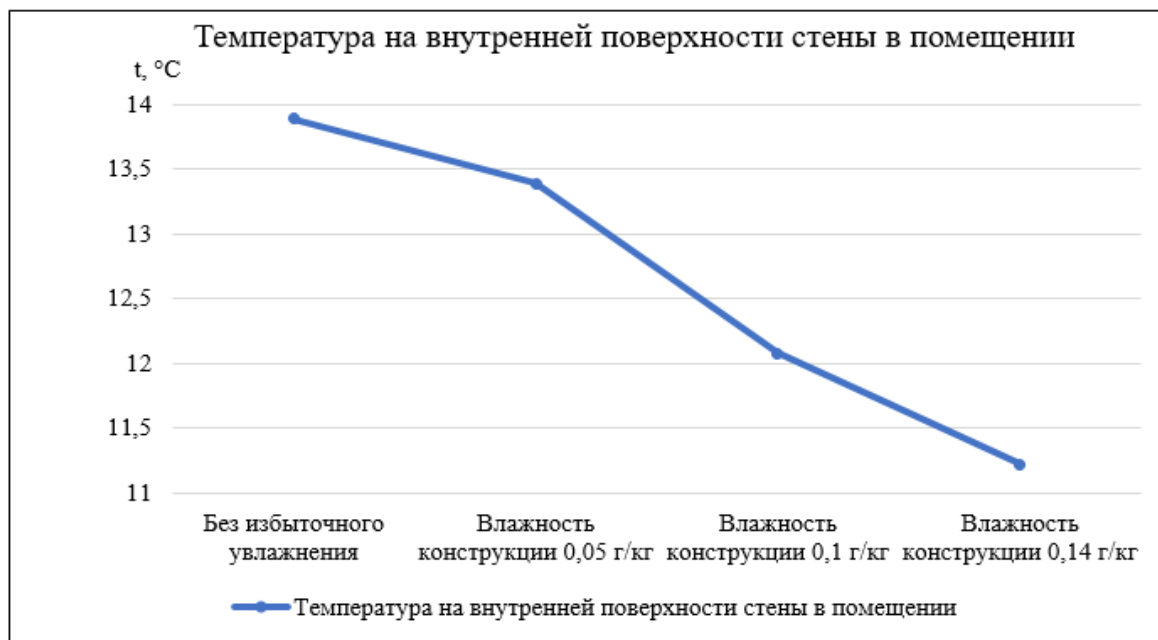


Рисунок 6 – Влияние влажности керамзитобетонной панели на температуру поверхности стен при температуре окружающего воздуха минус 26 °С

В целом, исходя из результатов расчетов и оценки эффектов, можно сделать вывод о том, что в ходе эксплуатации зданий наибольший прочностной и термический (вследствие ухудшений показателей теплопроводности) износ приходится на наружные ограждающие конструкции. При этом наибольшему износу с ростом циклов перехода температур наружного через подвергаются конструкции примерно на 20-45 % толщины. Поэтому основной задачей при проектировании/реконструкции зданий необходимо грамотно подходить к выбору материалов и технологий выполнения строительно-монтажных работ для обеспечения требуемого тепло-влажностного режима, и сохранения расчетной долговечности конструкций.

В работе были выполнены расчеты для зданий после капитального ремонта. Использование современных теплоизоляционных материалов, например, плит из экструзионного пенополистирола (CARBON ЭКО XPS или XPS Техноплекс FAS и пр.), для наружного применения устраняет указанные выше негативные факторы (рисунок 7). Удельные тепловые потери через наружные стены при применении теплоизоляции (~100 мм) уменьшаются в 4,2-4,7 раза.

Несущая конструкция МКД фактически полностью защищена от воздействия отрицательных температур и наружной атмосферной влаги, что непосредственно сказывается на ее теплотехнических, прочностных характеристиках (рисунок 8).

В условиях дефицита мощности источников энергоснабжения, технически оправданным решением может являться проведение доутепления наружных ограждающих

конструкций с применением материалов с низкой плотностью и теплопроводностью, а также повышенной пористостью при соблюдении требований к пароизоляции.

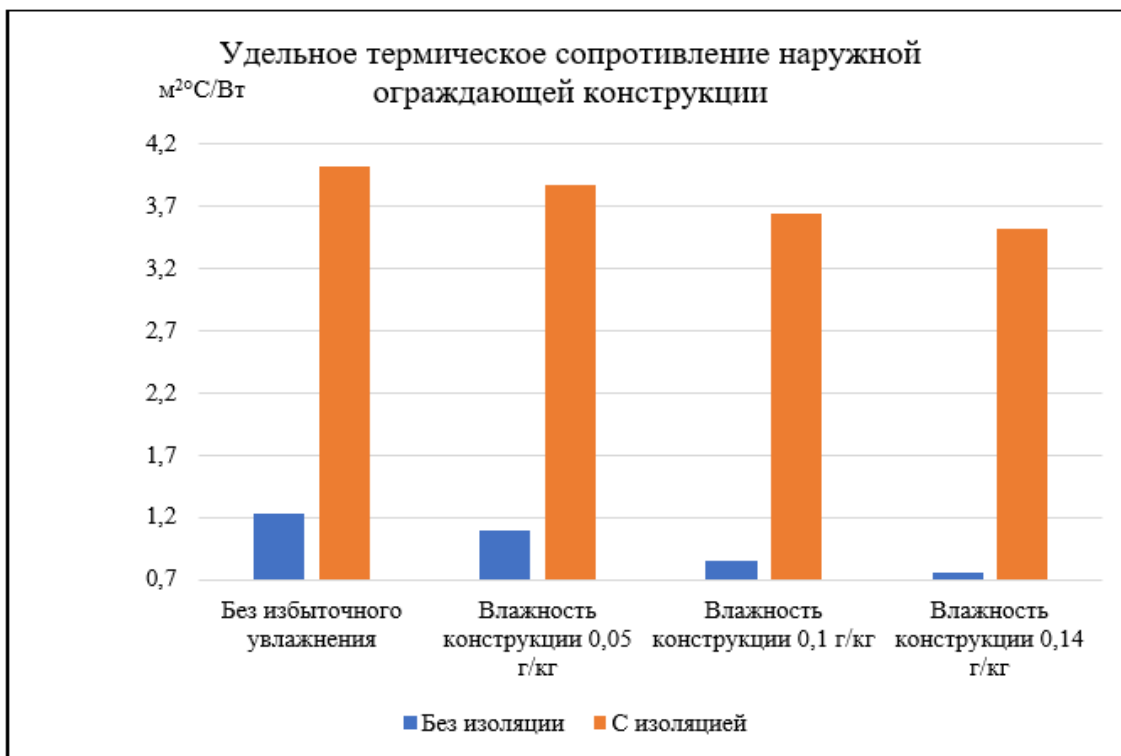


Рисунок 7 – Оценка влияния доутепления наружных ограждающих конструкций при изменении влажности для керамзитобетонной панели жилого дома

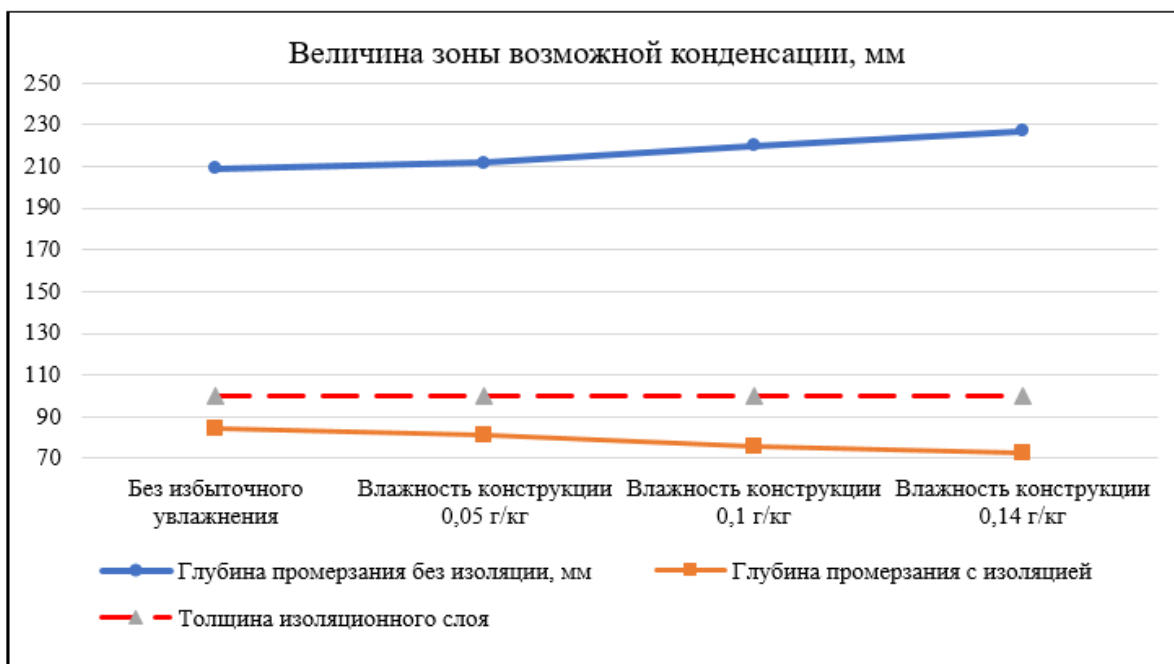


Рисунок 8 – Влияние эффектов доутепления на величину зоны возможной конденсации керамзитобетонной панели при температуре наружного воздуха минус 26 °С

При повышении теплозащитных качеств наружных ограждающих конструкций всего существующего жилого фонда Москвы до уровня приведенного сопротивления теплопередаче теплозащитной оболочки порядка 2,2-2,5 м<sup>2</sup>·°С/Вт прогнозируется снижение годового потребления тепла примерно на 15-25 % от текущего уровня. Кроме этого, благодаря утеплению зданий будет достигнуто высвобождение тепловой мощности в объеме порядка 25-35 % от существующей потребности (в зависимости от доли вентиляционной нагрузки), что создаст возможность для подключения новых объектов без строительства дополнительных источников теплоснабжения [6].

Комплекс мер экстренного утепления зданий существующего фонда в комплексе с промывкой и наладкой инженерных систем позволяет в короткие сроки снизить расчетную тепловую нагрузку именно отопления практически вдвое (с ~60 до ~30 Вт/м<sup>2</sup>). Высвобождение тепловой мощности для относительно небольшого квартала с 25-30 тыс кв. м жилой площади только по отопительной нагрузке составит около 1 Гкал/ч, дополнительно сократит пиковые нагрузки горячего водоснабжения, резко уменьшит экстренные нагрузки электроотопления примерно того же порядка (или позволит подключить к тем же тепловым сетям еще 25 тыс кв. м недвижимости без роста мощности).

Ключевые направления резервов высвобождения мощности энергоисточников и снижения нагрузки на систему ЖКХ при строительстве/эксплуатации, текущем и капитальном ремонте МКД могут базироваться на трех ключевых принципах: обеспечение энергоэффективности МКД на всех стадиях жизненного цикла; надежность источников и систем теплоснабжения при сохранении безусловной устойчивости к изменению внешних и внутренних факторов; долговечность МКД, сохранение/поддержание теплотехнических и прочностных характеристик в среднесрочной и долгосрочной перспективе эксплуатации.

Предложен предварительный набор технических, организационных и нормативных мер стимулирования политики энергосбережения и повышения энергетической эффективности зданий и сооружений существующего и нового фонда недвижимости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матросов, Ю. А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения / Ю. А. Матросов, – Москва : НИИСФ, 2008. – 496 с.
2. Строительная климатология: Справочное пособие к СНиП 23-01-99\*/ под. ред. чл.-кор. В. К. Савина. – Москва : НИИ строительной физики РААСН, 2006. – 258 с.
3. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций и микроклимат помещений / А. М. Протасевич. – Минск : БНТУ, 2016. – 452 с.
4. Малявина, Е. Г. Строительная теплофизика и микроклимат зданий / Е. Г. Малявина, О. Д. Самарин. – Москва : Издательство МИСИ-МГСУ, 2018. – 288 с.
5. Александровский, С. В. Долговечность наружных ограждающих конструкций / С. В. Александровский. – Москва : Издательство НИИСФ РАСН, 2004. – 333 с.
6. Энергоэффективность современных зданий мегаполисов в увязке архитектурно-строительных и эксплуатационных параметров / Е. Г. Гашо, С. А. Козлов, А. М. Фокин, А. А. Щукин // Энергосбережение. – 2026. – № 1. – С. 34-37.

## REFERENCES

1. Matrosov, Yu. A. Energy saving in buildings. The problem and ways to solve it / Yu. A. Matrosov. – Moscow : NIISF, 2008. – 496 p.
2. Construction climatology: A reference guide to SNiP 23-01-99\*/ ed. by chl.-cor. V. K. Savina. – Moscow : Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Natural Sciences, 2006. – 258 p.
3. Protasevich, A. M. Construction thermophysics of enclosing structures and indoor microclimate / A. M. Protasevich. – Minsk : BNTU, 2016. – 452 p.
4. Malyavina, E. G. Construction thermophysics and microclimate of buildings / E. G. Malyavina, O. D. Samarin. – Moscow : Publishing house of MISI-MGSU, 2018. – 288 p.
5. Alexandrovsky, S. V. Durability of external enclosing structures / S. V. Alexandrovsky. – Moscow : Publishing house of the Russian Academy of Sciences, 2004. – 333 p.
6. Energy efficiency of modern buildings in megacities in the context of architectural, construction and operational parameters / E. G. Gasho, S. A. Kozlov, A. M. Fokin, A. A. Shchukin // Energy saving. – 2026. – No. 1. – P. 34-37.

**ЭКОТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ОТ ЦОД: МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ**

ENVIRONMENTAL HEAT SUPPLY FROM A DATA CENTER:

MODELING AND ANALYSIS

**Кочетова Ж.Ю.**, доктор географических наук, доцент, доцент, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

**Kochetova Zh.Yu.**, DrSc in Geography, Docent, Associate Professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

**Внукова С.В.**, кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Vnukova S.V.**, PhD in Physics and Mathematics, Acting Head of the Electrical Engineering, Thermal Engineering and Hydraulics Department, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Тронин А.Л.**, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры, ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

**Tronin A.L.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Head of the Department, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

**Аннотация.** Представлены результаты моделирования системы утилизации низкопотенциального тепла центров обработки данных для нужд низкотемпературного теплоснабжения. Построена многоуровневая модель для расчета энергетических, эксергетических и экологических показателей. Проведен сравнительный анализ с существующими аналогами. На примере центра обработки данных мощностью 1 МВт показано, что внедрение системы позволяет утилизировать до 1,2 МВт тепловой мощности, снизить выбросы CO<sub>2</sub> на 532 тонны в год и обеспечить срок окупаемости в 6,5 лет. Рассмотрены перспективы применения технологии в российских условиях с учетом локализации крупных центров обработки данных.

**Ключевые слова:** утилизация тепла, центры обработки данных, ЦОД, математическое моделирование, выбросы CO<sub>2</sub>, энергоэффективность.

**Abstract.** The results of modeling of the low-potential heat utilization system of data processing centers for the needs of low-temperature heat supply are presented. A multilevel model has been built for calculating energy, exergetic and environmental indicators. A comparative analysis with existing analogues has been carried out. Using the example of a 1 MW data processing center, it is shown that the implementation of the system allows to utilize up to 1.2 MW of thermal power,

reduce CO<sub>2</sub> emissions by 532 tons per year and ensure a payback period of 6.5 years. The prospects of applying the technology in Russian conditions, taking into account the localization of large data centers, are considered.

**Keywords:** heat recovery, data centers, data centers, mathematical modeling, CO<sub>2</sub> emissions, energy efficiency.

Центры обработки данных (ЦОД) являются технологическим фундаментом цифровой экономики, они представляют собой специализированные инженерно-технические комплексы, предназначенные для размещения серверного и сетевого оборудования и обеспечения его бесперебойной работы. Рост облачных вычислений, наборы данных Big Data, интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта (ИИ) способствует их стремительному развитию. На сектор информационно-коммуникационных технологий, ядром которого являются центры обработки данных, приходится 4-7 % мирового потребления электроэнергии [1]. До 40 % этой энергии преобразуется в низкопотенциальное тепло (35-45 °С), которое в большинстве случаев рассеивается в атмосферу через системы чиллеров или градирен [2]. Это приводит к прямым потерям энергии и тепловому загрязнению относительно масштабных территорий.

Первые коммерческие ЦОД в России появились в середине 2000-х годов (Ростелеком, DataLine). Рост современно рынка обусловлен государственной программой «Цифровая экономика», импортозамещением и ростом спроса на облачные услуги. Согласно данным РАЕС, совокупная мощность российских ЦОД в 2023 году оценивалась в ~350 МВт, с прогнозируемым ростом до 500-600 МВт к 2030 году. Крупнейшие узлы сосредоточены в Московском регионе (более 50 % мощностей), Ленинградской области, специализированных зонах (например, «Сколково»). Развитие ЦОД привлекло внимание специалистов, решающих задачи декарбонизации теплоэнергетики и реализации принципов циркулярной экономики, трансформируя отходы в ценный ресурс. Полученную тепловую энергию можно направлять на отопление и горячее водоснабжение близлежащих жилых районов, социальных объектов, спортивных комплексов, а также на технологические нужды промпредприятий. Это особенно актуально для новых строящихся районов и технологических парков, где можно изначально закладывать интеграцию инфраструктуры.

Проблема утилизации тепла от ЦОД активно исследуется, при этом предлагаются различные технологии рекуперации [3-5]. Известна и практическая реализация этих подходов, например, система обогрева этажей в «Сколково», домов в г. Оденсе (Дания). Однако в большинстве существующих проектов используется тепло относительно высокого потенциала (> 45 °С) или не применяется комплексный подход с каскадными теплонасосными установками (ТНУ) для низкопотенциального тепла. В исследованиях [6-8] рассматриваются вопросы интеграции ЦОД в энергосистемы городов, но без детального эксергетического анализа и комплексной экономико-экологической оценки.

Цель работы – количественная оценка эколого-энергетической эффективности интеграции ЦОД в систему теплоснабжения на основе комплексного моделирования и сравнение предлагаемого решения с существующими аналогами.

Научная новизна заключается в разработке комплексной модели, объединяющей CFD-моделирование теплообменников, динамику системы в целом, эксергетический анализ и оценку жизненного цикла с точки зрения сокращения выбросов парниковых газов, с фокусом на применимость в условиях растущего российского рынка ЦОД.

В основе исследования лежит системный подход, сочетающий методы вычислительной гидродинамики, математического аппарата термодинамики и системной динамики. На первом этапе строили энергетическую и эксергетическую модели ТНУ. Для подъема температуры низкопотенциального тепла применена двухкаскадная схема ТНУ. Теоретический коэффициент трансформации (COP) для идеального цикла Карно определяется как:

$$COP_{идеал} = \frac{T_{выс}}{T_{выс} - T_{низ}}, \quad (1)$$

где  $T_{выс}$  и  $T_{низ}$  – абсолютные температуры нагревателя и холодильника соответственно, К. Эта формула применима к холодильным машинам и тепловым насосам, работающим по обратному циклу Карно. Для реального цикла COP рассчитывается с введением изэнтропического и термодинамического КПД [9].

Эксергетический КПД системы, оценивающий качество использования энергии, рассчитывался по методике, описанной в [10, 11]. Эксергетический метод анализа тепловых установок, разработанный Т.Д. Kotas, основан на использовании второго закона термодинамики для оценки качества использования энергии. Он позволяет учитывать не только количественные, но и качественные характеристики энергоресурсов, а также оценивать диссипативные потери в элементах системы. Эксергия определяется как максимальная работа, которую может совершить система при переходе из текущего состояния в состояние равновесия с окружающей средой. Это мера «работоспособности» энергии, учитывающая температуру, давление и другие параметры. Уравнение эксергетического баланса для системы имеет вид:

$$E_{вх} = E_{вых} + \sum D, \quad (2)$$

где  $E_{вх}$  и  $E_{вых}$  – эксергия на входе и выходе;  $\sum D$  – суммарные потери энергии.

Эксергетический КПД рассчитывается как отношение полезной эксергии на выходе к подводимой эксергии. Методика позволяет находить элементы системы, в которых происходят наибольшие потери эксергии, и определить приоритеты для их минимизации.

На втором этапе использовали CFD-моделирование и строили динамическую модель. Для точного расчета теплосъема в среде OpenFOAM была построена 3D-модель теплообменника. Решалась система уравнений Навье-Стокса, энергии и переноса для турбулентного режима течения с использованием гибридной модели турбулентности  $k-\omega$  SST [12]. Принцип работы этой модели заключается в том, что в пристенной области используется  $k-\omega$ -модель, во внешнем потоке –  $k-\varepsilon$ -модель, при этом вязкость ограничена.

Для анализа работы системы в разных погодных условиях в среде OpenModelica (свободное открытое программное обеспечение для моделирования, симуляции, оптимизации и анализа сложных динамических систем) разработана динамическая 1D-модель.

Энергетические и экологические показатели: для ЦОД электрической мощностью 1 МВт потенциал утилизации тепла составил 1,19 МВт. Интегральный COP каскадной ТНУ

составил в среднем за сезон 3,99 (таблица 1). Годовое производство тепла системой оценивается в 4,32 ГВт·ч. Сокращение выбросов CO<sub>2</sub> составляет 532 т ежегодно. Основной вклад в неопределенность данного показателя вносит углеродоемкость электроэнергии. При переходе на возобновляемые источники энергии данный показатель может быть снижен практически до нуля. Эксергетический КПД системы составил 45,2 %, что указывает на существенные необратимые потери, в основном в компрессорах и теплообменниках, и является резервом для дальнейшей оптимизации (таблица 2).

Таблица 1 – Энергетические и экологические показатели системы

Параметр	Значение
Тепловая мощность на утилизацию	1190 кВт
Средний COP ТНУ	3,99
Годовая выработка тепла	4320 МВт·ч
Сокращение выбросов CO <sub>2</sub>	532,1 т/год

Таблица 2 – Расчет эксергетического КПД системы

Параметр	Значение
Эксергия тепла на входе в ТНУ	166,6 кВт
Эксергия тепла на выходе из ТНУ	254,8 кВт
Эксергия электрической энергии	298,2 кВт
Эксергетический КПД	45,2 %

Результаты CFD-моделирования подтвердили возможность эффективного теплосъема с воздуха серверной при умеренных аэродинамических сопротивлениях (таблица 3). Капитальные затраты на систему оцениваются в 85 млн рублей. Чистый годовой денежный поток – 13,09 млн рублей. Простой срок окупаемости проекта составляет 6,5 лет, что является приемлемым показателем для энергосервисных проектов такой сложности. Сравнительный анализ с существующими аналогами показал, что предлагаемая каскадная схема ТНУ превосходит аналоги по ключевым показателям: обеспечивает более высокую температуру на выходе, что расширяет сферу применения тепла, демонстрирует более высокий COP и, как следствие, приводит к большему сокращению выбросов CO<sub>2</sub> (таблица 4).

Таблица 3 – Характеристики теплообменника (CFD-моделирование)

Параметр	Значение
Тепловой поток	119,0 кВт
Коэффициент теплопередачи	2150 Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
Перепад давлений (воздух)	240 Па

Таблица 4 – Сравнительный анализ систем утилизации тепла ЦОД

Параметр	Прямой нагрев воздуха	ТНУ (простая схема)	Предлагаемое решение (каскадная ТНУ)
Температура источника/приемника	40/25 °С	45/55 °С	40/65 °С
Сфера применения тепла	Подогрев приточного воздуха	Низкотемп. отопление	Низкотемп. отопление, горячее водоснабжение
Средний COP системы	-	~3,0	3,9
Годовое сокращение CO <sub>2</sub> (для ЦОД 1 МВт)	~150 т	~400 т	532 т

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Комплексное моделирование подтвердило высокую техническую возможность и эколого-экономическую целесообразность утилизации низкопотенциального тепла ЦОД с помощью каскадных теплонасосных установок.

2. Сравнительный анализ показал, что предлагаемое решение превосходит существующие аналоги (прямой нагрев воздуха, простые схемы ТНУ) по температурному потенциалу получаемого тепла, коэффициенту трансформации ( $COP = 3,99$ ) и достигаемому экологическому эффекту.

3. Упрощенная экологическая оценка наглядно демонстрирует, что внедрение системы для ЦОД мощностью 1 МВт позволяет предотвратить выбросы 532 тонн  $CO_2$  ежегодно. Это эквивалентно выбросам от ~250 автомобилей с пробегом 15 000 км в год.

4. Основным фактором экологической эффективности является углеродоемкость электроэнергии, питающей ТНУ. Интеграция системы с источниками возобновляемой энергии многократно усиливает ее положительный экологический эффект.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Recalibrating global data center energy-use estimates / E. Masanet, A. Shehabi, N. Lei [et al.] // *Science*. – 2020. – Vol. 367, Iss. 6481. – P. 984-986.

2. Waste heat recovery from a data centre and 5G smart poles for low-temperature district heating network / A. Khosravi, T. Laukkanen, V. Vuorinen, S. Syri // *Energy*, Elsevier. – 2021. – Vol. 218(C).

3. Ланьшина, Т. А. Переход крупнейших экономик мира к углеродной нейтральности: сферы потенциального сотрудничества с Россией / Т. А. Ланьшина, А. Д. Логинова, Д. Е. Стоянов // *Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика*. – 2021. – Т. 16, № 4. – С. 98-125.

4. Веселицкий, О. И. Центры обработки данных - зеленый вектор развития цифровой экономики / О. И. Веселицкий // *Инновации и инвестиции*. – 2018. – № 4. – С. 214-220.

5. Ebrahimi, K. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities / K. Ebrahimi, G. F. Jones, A. S. Fleischer // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – No. 31. – P. 622-638.

6. Guo, J. A review of the research and application of data center waste heat utilization technology / J. Guo, Y. Han, Y. Li // *Energy Reports*. – 2023. – Vol. 9. – P. 1432-1448.

7. Thermal management technologies for space data centers: Current status and prospects / J. Shi, X. Zhang, M. Yang [et al.] // *Journal of Refrigeration*. – 2026, Vol. 47, Iss. 1. – P. 1-19.

8. Xu, S. Thermal management and energy consumption in air, liquid, and free cooling systems for data centers: A Review / S. Xu, H. Zhang, Z. Wang, // *Energies*. – 2023. – No. 16. – P. 1279.

9. Бэр, Г.Д. Техническая термодинамика : Теоретические основы и технические приложения / Г. Д. Бэр. – Москва : Мир, 1977. – 518 с.

10. Kotas, T. J. The exergy method of thermal plant analysis / T. J. Kotas. – Krieger Publishing Company, 1995. – 328 p.

11. Дубанин, В.Ю. Термодинамика : учеб. пособие / В. Ю. Дубанин. – Воронеж : ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. – 145 с.

12. A CFD simulation and experimental study: predicting heat transfer performance using SST  $k-\omega$  turbulence model / C. D. Widiawaty, A. I. Siswantara, Budiarto [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 909, No. 1. – P. 12004.

## REFERENCES

1. Recalibrating global data center energy-use estimates / E. Masanet, A. Shehabi, N. Lei [et al.] // Science. – 2020. – Vol. 367, Iss. 6481. – P. 984-986.

2. Waste heat recovery from a data centre and 5G smart poles for low-temperature district heating network / A. Khosravi, T. Laukkanen, V. Vuorinen, S. Syri // Energy, Elsevier. – 2021. – Vol. 218(C).

3. Lanshina, T. The transition of the world's largest economies to carbon neutrality: areas of potential cooperation with Russia / T. Lanshina, A. Loginova, D. Stoyanov // Bulletin of International Organizations: Education, Science, New Economy. – 2021. – Vol. 16, No. 4. – P. 98-125.

4. Veselitsky, O. I. Data processing centers: A green vector for the development of the digital economy / O. I. Veselitsky // Innovations and Investments. – 2018. – No. 4. – P. 214-220.

5. Ebrahimi, K. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities / K. Ebrahimi, G. F. Jones, A. S. Fleischer // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – No. 31. – P. 622-638.

6. Guo, J. A review of the research and application of data center waste heat utilization technology / J. Guo, Y. Han, Y. Li // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9. – P. 1432-1448.

7. Thermal management technologies for space data centers: Current status and prospects / J. Shi, X. Zhang, M. Yang [et al.] // Journal of Refrigeration. – 2026, Vol. 47, Iss. 1. – P. 1-19.

8. Xu, S. Thermal management and energy consumption in air, liquid, and free cooling systems for data centers: A Review / S. Xu, H. Zhang, Z. Wang, // Energies. – 2023. –No. 16. – P. 1279.

9. Baer, G. D. Technical Thermodynamics : Theoretical Foundations and Technical Applications / G. D. Baer. – Moscow : Mir, 1977. – 518 p.

10. Kotas, T. J. The exergy method of thermal plant analysis / T. J. Kotas. – Krieger Publishing Company, 1995. – 328 p.

11. Dubanin, V. Yu. Thermodynamics : Textbook. / V. Yu. Dubanin. – Voronezh: Voronezh State Technical University, 2010. – 145 p.

12. A CFD simulation and experimental study: predicting heat transfer performance using SST  $k-\omega$  turbulence model / C. D. Widiawaty, A. I. Siswantara, Budiarto [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 909, No. 1. – P. 12004.

## ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ АСУ ТП И ЕЕ РОЛЬ В СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

### BUILDING AN AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM AND ITS ROLE IN MODERN INDUSTRY

**Кочин А.Е.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия

**Kochin A.E.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Муравьев А.В.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия

**Mureviev A.V.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Осипенко О.А.**, студент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия

**Osipenko O.A.**, Student, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Нерсесян Л.С.**, студент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия

**Nersesyan L.S.**, Student, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Аннотация.** В настоящее время использование автоматизированных систем все больше распространяется по мировой промышленности. Если пару десятилетий назад человечество не могло поверить в существование роботов-сварщиков, робо-такси, а полагалось только на использование ручного труда, то сегодня это стало обыденностью и во многих сферах промышленности ручной труд заменился машинным. Так же не стоит на месте и развитие в сфере автоматического управления на промышленных объектах. АСУ ТП – Автоматизированные системы управления технологическим процессом. Они все чаще и чаще применяются на различных объектах и в различных сферах промышленности.

**Ключевые слова:** Автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП), Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ), Диспетчерский контроль и сбор данных (SCADA), Человеко-машинный интерфейс (НМИ), Промышленный интернет вещей (IIoT), Противоаварийная автоматическая защита (ПАЗ).

**Abstract.** Currently, the use of automated systems is increasingly spreading throughout the global industry. If a couple of decades ago humanity could not believe in the existence of robot welders and robo-taxis, but relied only on the use of manual labor, today it has become commonplace and in many industries manual labor has been replaced by machine labor. The development in the field of automatic control at industrial facilities also does not stand still. Automated process control

systems are automated process control systems. They are increasingly being used at various facilities and in various industries.

**Keywords:** Automated Process Control Systems (automated Process Control Systems), Automated Commercial Electricity Metering System (ASIC), Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA), Human Machine Interface (HMI), Industrial Internet of Things (IIoT), Emergency automatic protection (GROOVE).

Автоматизация любого процесса преследует три основные цели: 1. Экономическая эффективность – себестоимость продукции снижается за счет более рационального использования сырья, ресурсов, а также возможности круглосуточного производства, без необходимости прерывать процесс. 2. Безопасность – Минимизация влияния человеческого фактора на процессы, уменьшение рисков воздействия на человека вредных веществ, высоких температур и иных факторов. 3. Качество и стабильность – автоматическая линия позволяет выпускать продукцию с повторяемостью и качеством изделий не доступной при использовании человеческого труда. Все три основные цели достигаются путем соблюдения иерархии построения системы, использованием современного оборудования и построение систем контроля [1-5].

Любая АСУ ТП состоит из большого количества элементов, поэтому была создана иерархия автоматизации, по которой строится любая система [6]. Пример SCADA системы представлен на рисунке 1.

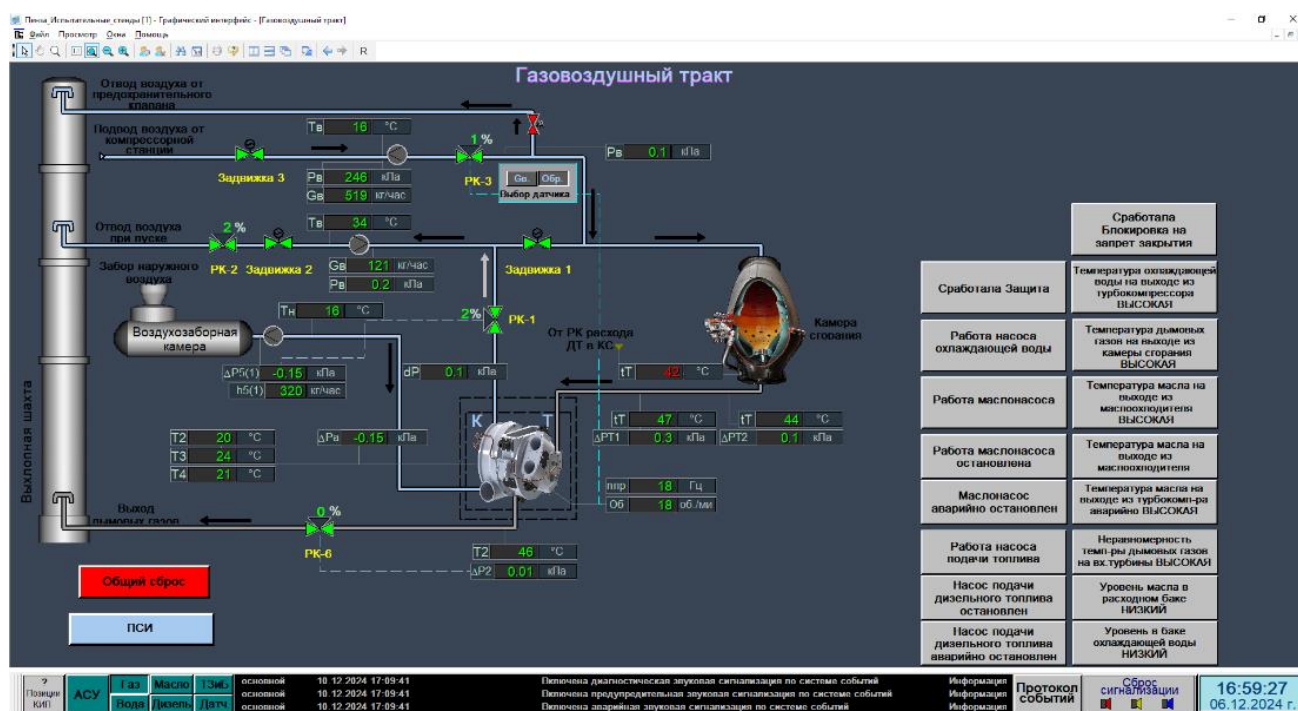


Рисунок 1 – Пример SCADA системы

На верхнем уровне иерархии располагается SCADA – это программно-аппаратные комплексы для автоматизации, мониторинга и управления технологическими процессами в реальном времени и HMI – Human machine interface. SCADA получает информацию со всех

контроллеров, отображает ее, а так же позволяет управлять процессом с помощью оператора, либо удаленного подключения к серверу SCADA [4, 5]. HMI – как правило это АРМ (Автоматизированное рабочее место оператора).

На среднем уровне располагаются программируемые логические контроллеры, регуляторы, программируемые реле. Все они собирают информацию с нижнего уровня, обрабатывают, корректируют работу системы при определенных изменениях, а также передают полученные данные на верхний уровень. Нижний уровень состоит из исполнительных механизмов, датчиков, сенсоров и еще большого множества исполнительного и измерительного оборудования.

В настоящее время существует три тренда в развитии АСУ ТП: 1. Промышленный интернет вещей (IIoT) – датчики могут передавать информацию не только на контроллер для местного управления, но и напрямую на удаленный сервер для анализа данных. 2. Цифровые двойники – технологический процесс модулируется на компьютере, тем самым становится возможным заранее просчитывать различные варианты, тестировать различные обновления и настройки, моделировать различные режимы работы и прогнозировать износ оборудования. 3. Предиктивная аналитика – система собирает параметры и на их основе строит аналитику по возможным поломкам.

Но за любой системой АСУ ТП строится надзор. Системы контроля следят за выполнением технологического процесса и выполнением требований безопасности. Системы контроля на промышленных объектах так же имеют свою классификацию [7-10]: 1. Системы контроля технических параметров – они непрерывно осуществляют контроль физических величин важных для конкретного процесса, давления и температуры, расхода и уровня необходимы для учета сред и поддержания баланса в емкости, анализаторы состава и качества для контроля продукции на выходе с производства и состава сырья на входе. 2. Системы противоаварийной защиты (ПАЗ) – это вид контроля, который постоянно находится в режиме ожидания. В случае если параметры выходят за опасные пределы система автоматически включается и инициирует защитные действия (отключение, сброс, включение тревоги). Поскольку ПАЗ – это очень важная система в АСУ ТП, то они имеют более высокий уровень надежности и сертификации, чем другие контроллеры. Так же они обязательно должны обладать резервированием (АВР). 3. Системы технического диагностирования – эти системы направлены на контроль оборудования. Так, например, есть контроль вибрации насосов, тепловизионный контроль за нагревом или охлаждением оборудования. 4. Системы экологического и промышленного контроля обеспечивают безопасность персонала и окружающей среды. В их число входят газоанализаторы, которые контролируют чистоту воздуха в помещениях, складах, хранилищах и при необходимости включают аварийную вентиляцию. Контроль запыленности и дыма часто используются в пожарных сигнализациях. 5. Системы технического учета (АСКУЭ) – эти системы ведут учет потребления ресурсов и энергии (вода, электричество, тепло). С помощью этой системы происходит оптимизация потребляемых ресурсов предприятием. 6. Видеоконтроль и охранные системы – камеры во взрывозащищенном исполнении позволяют наблюдать за опасными или недоступными человеку местами, системы охранного видеонаблюдения.

Построение и внедрение любой системы АСУ ТП дорогостоящий процесс. Расчет затрат на проектирование и внедрение АСУ ТП производится по нескольким формулам. Продолжительность проведения работ определяется нормативами, либо по формуле:

$$T_0 = (3 * T_{\min} + 2 * T_{\max}) / 5, \quad (1)$$

где  $T_0$  – ожидаемая продолжительность работ;  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  – наименьшее и наибольшее время необходимое на выполнение работ.

Затраты на проектирования рассчитываются по формуле:

$$K_K = C + Z_n + M_n + H, \quad (2)$$

где  $C$  – первоначальная стоимость программного продукта;  $Z_n$  – заработная плата всех задействованных специалистов;  $M_n$  – затраты на использование ЭВМ;  $H$  – накладные расходы.

В свою очередь  $Z_n$  рассчитывается по формуле:

$$Z_n = Z_0 * T_n * \left(1 + \frac{A_c}{100}\right) * \left(1 + \frac{A_n}{100}\right), \quad (3)$$

где  $Z_0$  – заработная плата за день;  $T_n$  – продолжительность проектирования;  $A_c$  – процент отчислений на социальное страхование;  $A_n$  – процент премий.

Расчет годовой экономии при внедрении систем производится по формуле:

$$\mathcal{E}_p = (P_1 - P_2) + \Delta P_n, \quad (4)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – соответственно эксплуатационные расходы до и после внедрения системы;  $\Delta P_n$  – экономия на повышении производительности труда.

Подводя итоги, с уверенностью можно сказать, что любое современное производство не может обойтись без систем автоматизации и диспетчеризации. Все перечисленные во введении цели достигаются благодаря правильному построению системы АСУ ТП. А эффективность и надежность системы достигается четким разделением функций по иерархии системы. Так же очень важную роль играет ПАЗ, без которого любая система со временем разрушится. А система АСКУЭ позволяет снизить затраты на производство и уменьшить риск для персонала и окружающей среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юсупов, Р. Х. Основы автоматизированных систем управления технологическими процессами : учеб. пособие / Р. Х. Юсупов. – Москва; Волгоград : Инфра-Инженерия, 2025. – 132 с.
2. Технологические процессы автоматизированных производств: учеб. пособие / В. Н. Пряхин, М. А. Карапетян, Ю. А. Крюков, Е. С. Лукина. – Москва : Издательство Спутник+, 2023. – 228 с.
3. Музипов, Х. Н. Программно-технические комплексы автоматизированных систем управления: учеб. пособие / Х. Н. Музипов. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2015. – 170 с.
4. Пьявченко, Т. А. Автоматизированные информационно-управляющие системы с применением SCADA-системы Trace Mode: учеб. пособие для вузов / Т. А. Пьявченко. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 336с.

5. Бухарбаев, М. А. Реализация алгоритмов управления и визуализации данных в SCADA-системах: учеб. пособие / М. А. Бухарбаев, В. Н. Казагачев. – Алматы : ADAL KITAP, 2025. – 176 с.

6. Немченко, В. И. Разработка информационной подсистемы АСУ ТП: учеб. пособие по курсовому проектированию / В. И. Немченко, Г. Н. Епифанова. – Самара : Самарский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2017. – 55 с.

7. Гладких, Т. Д. Надежность системы управления: учеб. пособие / Т. Д. Гладких; Министерство науки и высшего образования РФ, Тюменский индустриальный университет. – Тюмень : ТИУ, 2023. – 124 с.

8. Аристова, Н. И. Промышленные программно-аппаратные средства на отечественном рынке АСУ ТП / Н. И. Аристова, А. И. Корнеева. – Москва : Научтехлитиздат, 2001. – 402 с.

9. Ицкович, Э. Л. Особенности микропроцессорных программно-технических комплексов разных фирм и их выбор для конкретных объектов / Э. Л. Ицкович // Приборы и системы управления. – 1997. – № 4. – С. 1-5.

10. Кругляк, К. Промышленные сети: цели и средства/ К. Кругляк // Современные технологии автоматизации. – 2002. – № 4. – С. 6-17.

## REFERENCES

1. Yusupov, R. H. Fundamentals of automated process control systems: Textbook / R. H. Yusupov. – Moscow; Volgograd : Infra–Engineering, 2025. – 132 p.

2. Technological processes of automated production: Textbook / V. N. Pryakhin, M. A. Karapetyan, Yu. A. Kryukov, E. S. Lukina. – Moscow : Sputnik+, 2023. – 228 p.

3. Muzipov, Kh. N. Software and hardware complexes of automated control systems: Textbook / Kh. N. Muzipov. – Tyumen : Tyumen State Oil and Gas University, 2015. – 170 p.

4. Pivchenko, T. A. Automated information and control systems using the trace mode SCADA system: Textbook for Universities / T. A. Pivchenko. – St. Petersburg : Lan, 2024. – 336 p.

5. Bukharaev, M. A. Implementation of control algorithms and data visualization in SCADA systems: Textbook / M. A. Bukharaev, V. N. Kazagachev. – Almaty : ADAL KITAP, 2025. – 176 p.

6. Nemchenko, V. I. Development of the information subsystem of the automated process control system: Textbook for Course Design / V. I. Nemchenko, G. N. Epifanova. – Samara : Samara State Technical University, EBS ASV, 2017. – 55 p.

7. Gladkikh, T. D. Reliability of the control system: Textbook / T. D. Gladkikh; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Tyumen Industrial University. – Tyumen : TIU, 2023. – 124 p.

8. Aristova, N. I. Industrial software and hardware tools on the domestic market of automated process control systems / N. I. Aristova, A. I. Korneeva. – Moscow : Naughtekhlitizdat, 2001. – 402 p.

9. Itskovich, E. L. Features of microprocessor software and hardware systems from different companies and their selection for specific objects / E. L. Itskovich // Devices and Control Systems. – 1997. – No. 4. – P. 1-5.

10. Kruglyak, K. Industrial networks: goals and means/ K. Kruglyak // Modern Automation Technologies. – 2002. – No. 4. – P. 6-17.

## **ЭВОЛЮЦИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС: АВТОМАТИЗАЦИЯ ВВЭР-ТОИ** EVALUATION OF THE EVOLUTION OF NUCLEAR POWER UNIT: PWR-TOI AUTOMATION

**Кулакова В.А.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Kulakova V.A.**, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Кожухов Н.Н.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Kozhukhov N.N.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В работе рассмотрена эволюция нескольких поколений энергоблоков АЭС, выполнен анализ предшествующих этому развитию аварий, которые стимулировали прогресс. На примере энергоблока ВВЭР-ТОИ показаны технологические особенности и автоматизированная система управления, позволяющие увеличивать его устойчивость в аварийных ситуациях.

**Ключевые слова:** АЭС, энергоблок, ВВЭР-ТОИ, автоматизированная система управления технологическим процессом.

**Abstract.** In this work, the evolution of nuclear power plant unit generations was examined, along with the preceding developments and the accidents that spurred progress. The VVER-TOI power unit was also reviewed, including its technological features and automated control system, which have helped increase its resilience in emergency situations.

**Keywords:** nuclear power plant, generations of nuclear power plant units, PWR-TOI, automated process control system.

Одной из основополагающих проблем, волнующая большую часть населения при эксплуатации атомных электростанций является их безопасность. Аварии, происходящие на ядерных объектах, зачастую могут наносить вред не только здоровью обслуживающего персонала, но и окружающей среде и близлежащим поселениям, а также в случае крупных техногенных катастроф на таких объектах, последствия могут оказаться далеки от прогнозных значений. Задача перед проектировщиками, инженерами и оперативным персоналом состоит в обеспечении безопасной и стабильной эксплуатации ядерных объектов, учитывая все возможные события.

На атомных станциях для классификации безопасности энергоблока используют систему поколений: от I до III+. Каждому новому поколению предшествовала долгая эксплуатация, с наработкой улучшений и нововведений с систему безопасности энергоблока.

К первому поколению энергоблоков относился, например, энергоблок АМ-1 на Обнинской АЭС. Данный энергоблок был первопроходцем в области гражданской выработки

электроэнергии благодаря реакциям деления ядер урана, не только в нашей стране, но и во всем мире. Как у первой промышленной атомной электростанции в мире, при возведении энергоблока было допущено множество нарушений с точки зрения безопасности по нынешним меркам. Ядерный реактор не обладал оболочкой препятствующей, в случаях аварии и расплавлению активной зоны, загрязнению окружающей среды. Но благодаря высококвалифицированному персоналу и ответственному подходу к эксплуатации, единственный энергоблок Обнинской АЭС отработал 48 лет после ввода в эксплуатацию без серьезных аварий, и был остановлен в 2002 году.

Обратная ситуация была с энергоблоком PWR TMI-2 на АЭС Три-Май-Айленд в США, штате Пенсильвания. Данный энергоблок хоть и был более совершенен с инженерной точки зрения и относился к II поколению энергоблоков, все еще не был наделен защитной оболочкой, что и оказало большое влияние на последствия аварии 28 марта 1979 года. После проведения плановых предупредительных работ (ППР), блок был пущен в эксплуатацию с не полностью работающим оборудованием. Хронология событий показывает, что после выхода из строя одного из конденсатных насосов, активная зона начала быстро нагреваться, персонал предпринял действия к устранению аварии и подключил подачу питательной воды из аварийных насосов, но в ходе ППР данные насосы были полностью заглушены, и после окончания ППР не была поднята запорная арматура. Это привело к тому, что произошло расплавление активной зоны и безвозвратная потеря управления блоком. К аварии привело несколько факторов: некорректно проведенные ППР, отсутствие инженерных решений, которые снизили бы последствия аварии, а также неверная оценка обстановки персоналом. Таким образом, совокупность данных факторов привела к первой серьезной радиоактивной аварии.

В следующем поколении были учтены ошибки в эксплуатации предыдущего поколения, все блоки III поколения оснащаются оболочками, которые изолируют ядерный реактор и защищают его от внешнего воздействия. Также было принято решение о размещении дизель-генераторов для поддержания работы блока при авариях в энергосистеме и отключении оборудования в чрезвычайных случаях. Несмотря на продолжительную эволюцию безопасности энергоблоков, катастрофы все еще возможны. Это показывает опыт эксплуатации АЭС Фукусима, которая 11 марта 2011 года столкнулась с самой масштабной катастрофой в истории своей страны. После масштабного землетрясения в Тихом океане, последовало цунами, которое обрушилось на станцию. Несмотря на предпринятые меры при проектировании станции: волнорезы, размещение блочных насосных станций на возвышенностях и аварийные дизель-генераторы, цунами все равно разрушило дизель-генераторы и вывело из строя главные циркуляционные насосы станции. Персонал станции предпринял попытки восстановления энергоснабжения станции, но безуспешно. Энергоблоки с 1 по 4 детонировали из-за накопления паро-циркониевой смеси, а активная зона была расплавлена.

Несмотря на долгую историю развития и эксплуатации ядерной промышленности, перед инженерами постоянно стоит задача улучшения систем безопасности и противодействия авариям. На данный момент поставленные задачи решают современные блоки поколения III+, которые оборудуются системами пассивной защиты, обеспечивают

устойчивость природным катаклизмам и оснащаются ловушками расплава активной зоны. Первым блоком данного поколения был 6 энергоблок НВАЭС ВВЭР-1200, введенным в эксплуатацию в 2016 году. Он обладает системой защиты от перегрева блока, путем оснащения теплообменниками, которые в случае полного отключения от энергосистемы и не работающих дизель-генераторов, способны поддерживать оптимальную температуру в активной зоне.

Вся эволюция поколений энергоблоков АЭС ставила перед собой задачу улучшения уровня безопасности и осознанности персонала, для предотвращения и упреждения аварийных ситуаций. Последним на данный момент пущенным в эксплуатацию энергоблоком в нашей стране является ВВЭР-ТОИ (ВВЭР-типовой оптимизированный и информатизированный) Курской АЭС 2. Данный энергоблок является доработанной и оптимизированной версией энергоблока ВВЭР-1200, способный показывать номинальную мощность в 1255 МВт. Данный энергоблок является одной из ступеней к решению проблем с ядерным топливом в России, используя его совместно с энергоблоком БРЕСТ-ОД-300, в опытно-демонстративном комплексе в городе Северске будет продемонстрирован полный замкнутый ядерный топливный цикл.

Для безопасной работы энергоблоков любых типов рост уровня технической безопасности обязательно должен быть сопряжен с высокой квалификацией обслуживающего персонала. Ведь одной из причин появления серьезных аварий на АЭС является вовсе не система или защита, а человеческий фактор. Несмотря на подготовку персонала и постоянные тренинги, и повышение квалификации, в случае возникновения чрезвычайной ситуации даже опытный персонал способен неверно оценивать ситуацию, и принятые им решения могут только усугублять ситуацию. Внедрение в производственный процесс автоматизированной системы управления в технологических процессах (АСУТП), позволит избежать ошибок, вызванных человеком, и повысит уровень безопасности.

Энергоблок ВВЭР-ТОИ, как наиболее современный тип блока, обладает наиболее развитой и продвинутой системой автоматизации. По сравнению с более старыми поколениями блоков, новое поколение обладает следующими особенностями:

1) Основным способом индикации показателей и управления блока является дисплейный способ. Он дает возможность управления блоком дистанционно, позволяет задавать режим работы оборудования и регуляторов, а также автоматизировать управление оборудованием в нормальных условиях.

2) За счет глубокой самодиагностики АСУТП, система исключает необходимость периодического технического обслуживания

3) Использование экрана коллективного пользования, обеспечивающий донесение до всего персонала обобщенных данных по технологическим параметрам блока и фиксированных отклонениях при эксплуатации.

4) Повышение общего уровня автоматизации по сравнению с прошлыми поколениями за счет реализации функционально-группового управления.

В заключении отметим, что в атомной промышленности постоянно продолжается поиск новых инженерных решений как в области проектирования блока, так и в увеличении

способов автоматизации управления, для исключения ошибок, связанных с человеческим фактором.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные подходы к созданию АСУТП ВВЭР нового поколения / В. А. Горбаев, А. Е. Калинушкин, Ю. М. Семченков [и др.] // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109, Вып. 5. – С. 267-271.
2. Алпеев, А. С. Автоматизированное управление и безопасность АС / А. С. Алпеев // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90, Вып. 2. – С. 96-101.
3. Практика и задачи научного обеспечения работ по ядерному наследию / Л. А. Большов, И. И. Линге, А. А. Саркисов, С. С. Уткин // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120, Вып. 4. – С. 201-207.
4. Роль АЭС в электроэнергетике России с учетом ограничений выбросов углерода / Е. О. Адамов, Д. А. Толстоухов, С. А. Панов [и др.] // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130, Вып. 3. – С. 123-131.
5. О стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г / П. Н. Алексеев, В. Г. Асмолов, А. Ю. Гагаринский [и др.] // Атомная энергия. – 2011. – Т. 111, Вып. 4. – С. 183-196.

### REFERENCES

1. Modern Approches to Creation automated process control System of New Generation ВВЭР / V. A. Gorbalev, A. E. Kalinushkin, Yu. M. Semchenkov [et al.] // Atomic energy Journal. – 2010. – Vol. 109, Iss. 5. – P. 267-271.
2. Alpeev, A. S. Automated Control and NPP Safety Ensuring / A. S. Apleev // Atomic energy Journal. – 2001. – Vol. 90, Iss. 2. – P. 96-101.
3. Scientific Support for Nuclear Legacy Sites: Experience Gained and Future Talks / L. A. Bolshov, I. I. Linge, A. A. Sarkisov, S. S. Utkin // Atomic energy Journal. – 2016. – Vol.120, Iss. 4. – P. 201-207.
4. Role of Nuclear Power Plants in the Russian Power Industry to Meet the Carbon Emissions Requirements / E. O. Adamov, D. A. Tolstoukhov, S. A. Panov [et al.] // Atomic energy Journal. – 2021. – Vol. 130, Iss. 3. – P. 123-131.
5. On Russia's Nuclear Energy Strategy to 2050 / P. N. Alekseev, V. G. Asmolov, A. Yu. Gagarinsky [et al.] // Atomic energy Journal. – 2011. – Vol. 111, Iss. 4. – P. 183-196.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОГРЕВА УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА

### MATHEMATICAL SIMULATION OF CARBON-CONTAINING MATERIAL HEATING PROCESS

**Ларионов А.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I», Воронеж, Россия

**Larionov A.N.**, DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

**Машин В.Н.**, кандидат педагогических наук, доцент, доцент, ФГКВБОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

**Mashin V.N.**, PhD in Pedagogical Sciences, Docent, Associate professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

**Чёнгин В.Ю.**, старший преподаватель, ФГКВБОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

**Chyongin V.Yu.**, Senior lecturer, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

**Машина А.В.**, старший научный сотрудник, ФГКВБОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

**Machina A.V.**, Senior Researcher, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

**Аннотация.** Анализируется процесс активации углеродных материалов. Представлено решение задач прогрева углеродных частиц, имеющих форму пластинки вдоль центральной части, цилиндрических образцов вдоль радиуса, эллипсоидов. Выполнено обобщение задачи для частиц, полученных в результате дробления углеродосодержащих материалов. Сильная зависимость продолжительности процесса прогрева от размеров образца указывает на необходимость фиксации геометрических параметров частиц в узком интервале.

**Ключевые слова:** углеродные материалы, поверхностное обгорание, активация, окислитель, тепловой поток.

**Abstract.** The activation process of carbon materials is analyzed. The solution of the problems of heating carbon particles having the shape of a plate along the central part, cylindrical samples along the radius, and ellipsoids is presented. The problem is generalized for particles obtained as a result of crushing carbon-containing materials. The strong dependence of the duration of the heating process

on the sample size indicates the need to fix the geometric parameters of the particles in a narrow range.

**Keywords:** carbon materials, surface combustion, activation, oxidizer, heat flow.

Угольные ископаемые составляют более 87 % прогнозируемых ресурсов ископаемого топлива Земли [1]. Физический процесс активации углеродных материалов заключается в газификации коксового остатка окислительными газами. При газификации, в местах вскрытия пор, образованных при термическом разложении исходных органических веществ, происходит частичное превращение твердой фазы в газовую. В коксовом остатке формируется пористая структура. В процессе активации необходимо свести к минимуму поверхностное обгорание частиц и получить активированный уголь с развитой пористой структурой. Это достигается проведением процесса при относительно низкой температуре (300÷1000 °С), когда определяющим звеном является скорость химической реакции (кинетический предел) и диффузия газов в поры частиц [2].

В качестве окислительных газов могут использоваться водяной пар, углекислый газ и некоторые другие. Газификация вызывает значительную эрозию углеродной поверхности – тем более сильную, чем менее активен окислитель. Поскольку этот процесс идет с поглощением тепла (энергии), то его интенсивность зависит, в том числе и от транспорта энергии: она выше в локально более горячих точках. Это способствует глубокому развитию пор, и, одновременно, сохранению тонких стенок между порами, которые были «охлаждены» ранее реализованными эндотермическими актами.

В данном случае конкурируют два фактора – подвод тепла к месту реакции по массиву углеродного материала, и его поступление вместе с реагентом с водяным паром (H<sub>2</sub>O). В случае преобладания вклада первого фактора идет глубокое развитие пор, если преобладает вклад второго фактора, то идет равномерный обгар поверхности и прогар перегородок – укрупнение пор. Таким образом, активация без обгорания невозможна, для сокращения обгорания следует нагрев вещества производить по отдельному, не связанному с H<sub>2</sub>O каналу [1, 3]. Например, индукционно, когда с развитием пор, индукционный разогрев будет смещаться внутрь массива углерода, обеспечивая условия развития глубокой пористости.

Решение задачи о прогреве углеродосодержащего материала основано на теории теплопроводности [2, 4]. Поток тепла, обусловленный теплопроводностью твердого тела, описывается законом Фурье

$$\frac{dQ}{dt} = \int_S dS_i \lambda_{ik} \nabla_k T, \quad (1)$$

где  $\lambda_{ik} = \text{diag}(\lambda_{\parallel} \lambda_{\parallel} \lambda_{\perp})$  – матрица теплопроводности, которая определяется коэффициентами теплопроводности вдоль слоистого материала  $\lambda_{\parallel}$  и перпендикулярно слоям  $\lambda_{\perp}$ ;  $\nabla_k T$  – градиент температуры [2, 5].

Повышение температуры тела определяет тепловой поток

$$\frac{dQ}{dt} = \int_V dV \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) следует

$$\int_S dS_i \lambda_{ik} \nabla_k T = \int_V dV \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3)$$

Следовательно

$$\int_V dV \nabla_i \lambda_{ik} \nabla_k T = \int_V dV \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (4)$$

Окончательно

$$\nabla_i \lambda_{ik} \nabla_k T = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (5)$$

Уравнение температуропроводности однородного слоистого материала имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha_{\parallel}^2 \nabla_{ik} \nabla_k T = 0, \quad (6)$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho c}} \quad (7)$$

коэффициент температуропроводности. Уравнение (6) можно преобразовать к виду [5]

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha_{\parallel}^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \alpha_{\perp}^2 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (8)$$

При решении конкретных задач удобно заменить

$$x \rightarrow \alpha_{\parallel} x, \quad y \rightarrow \alpha_{\parallel} y, \quad z \rightarrow \alpha_{\perp} z.$$

Такая замена позволяет преобразовать уравнение температуропроводности (8) к виду [3]

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \Delta T = 0. \quad (9)$$

Задача анализа нагревания цилиндрической частицы вдоль оси моделирует прогрев плоского образца (например, чешуйки, пластинки) вдоль его центральной части.

В этом случае граничные условия для функции  $T(t, z)$  следует записать в виде  $T(0, z) = T_0$ ;  $T(t, 0) = T(t, \ell) = T_1$ . Здесь  $\ell$  – длина цилиндра.

Температуропроводность в направлении перпендикулярно слоям  $\alpha^2 = \alpha_{\perp}^2$ . Уравнение теплопроводности запишется в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{\perp}^2 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}.$$

Решение уравнения теплопроводности с учетом указанных граничных условий

$$T(t, z) = T_1 + \frac{2}{\pi} (T_1 - T_0) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\left(k - \frac{1}{2}\right)} \cos \frac{\pi}{\ell} \left(k - \frac{1}{2}\right) \left(z - \frac{\ell}{2}\right) \times \\ \times \exp \left[ -\frac{4\alpha_{\perp}^2}{\ell^2} \pi \left(k - \frac{1}{2}\right)^2 t \right]. \quad (10)$$

Задача прогрева диска вдоль радиуса моделирует прогрев цилиндрических образцов (иглы, волокна, опилки) в направлении, перпендикулярном оси [2, 4].

Для этой задачи граничные условия для функции  $T(t, r)$  можно записать в виде  $T(0, r) = T_0$ ;  $T(t, R) = T_1$ .

Уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (11)$$

где

$$r = \sqrt{\frac{x^2}{\alpha_{\parallel}^2} + \frac{z^2}{\alpha_{\perp}^2}}.$$

Решение уравнения (11) с учетом граничных условий запишется в виде

$$T = T_1 - 2(T_1 - T_0) \left\{ 0,7J_0 \left( \frac{2,4r}{R} \right)^{-\left(\frac{2,4}{R}\right)^2 t} + 0,45J_0 \left( \frac{5,5r}{R} \right)^{-\left(\frac{5,5}{R}\right)^2 t} + \right. \\ \left. + 0,46J_0 \left( \frac{8,7r}{R} \right)^{-\left(\frac{8,7}{R}\right)^2 t} + \dots \right\}. \quad (12)$$

Здесь  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка.

Решение задачи прогрева эллипсоида моделирует прогрев среднестатистического образца материала (гранулы, близкой к сферической и любой другой существенно трехмерной формы).

Граничные условия для функции  $T(t, r)$  следует записать в виде  $T(0, r) = T_0$ ,  $T(t, R) = T_1$ .

Уравнение теплопроводности для данной задачи

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (13)$$

Здесь

$$r = \sqrt{\frac{x^2}{\alpha_{\parallel}^2} + \frac{y^2}{\alpha_{\parallel}^2} + \frac{z^2}{\alpha_{\perp}^2}}.$$

Решение уравнения (13) следует искать в виде

$$T = T_1 - \frac{2}{\pi} (T_1 - T_0) \frac{R}{r} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k} \sin \frac{\pi k r}{R} \exp \left[ - \left( \frac{\pi k}{R} \right)^2 t \right]. \quad (14)$$

Из приведенных примеров следует, что распределение температуры внутри образца нагреваемого материала существенно зависит от его формы. Полученные выражения распределения температур для правильных геометрических форм, позволяют судить о распределении температур в близких по форме образцах.

Можно обобщить задачу, вводя понятие о «средней» форме образца, например, для материалов, получаемых дроблением [1]. Учитывая возможную анизотропию их свойств, как это имеет место для антрацитов и различных их производных, такой формой следует признать

эллипсоид с осями, длины которых пропорциональны величинам их механических характеристик таких, как механическая прочность вдоль соответствующих направлений.

Несмотря на различие выражений для распределения температур в образцах различных форм, из них удастся получить близкие по смыслу и значению оценки времени ( $\tau$ ) прогрева образца

$$\tau \sim \frac{R^2}{\alpha^2},$$

где, как отмечалось раньше  $\alpha$  – температуропроводность, средневзвешенная по направлениям;  $R$  – условный геометрический размер, например радиус шара, диска.

Физический смысл времени прогрева  $\tau$  – время, необходимое для достижения температуры внутри образца, отличающееся от максимально возможного при данных граничных условиях приблизительно на одну треть, то есть

$$T(\tau) = T_{\max} - \frac{1}{e} T_{\max} = T_{\max} \frac{e - 1}{e}.$$

Такую оценку можно проиллюстрировать анализом решения задачи для эллипсоида.

При  $t \rightarrow 0$  и  $r \rightarrow 0$

$$T = T_1 + \frac{2}{\pi} (T_1 - T_0) \frac{R}{r} \left( -\frac{\pi r}{2R} \right) = T_0,$$

а при  $t \rightarrow \infty$  и  $T = T_1$

При этом учтено, что

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k} \operatorname{sink}x = -\frac{x}{2}.$$

В текущий момент времени  $t$  температура определяется выражением

$$T = T_1 - T_1 \tilde{\alpha} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Здесь  $\tilde{\alpha}$  – коэффициент, учитывающий форму образца.

Установленная сильная зависимость времени прогрева от размеров образца указывает на необходимость выбора для термообработки более узкого по крупности состава сырья [1, 3]. Она не может не оказывать влияния на технологию, и непосредственно влияет на качество продукта, которое определяется температурой нагрева и временем выдержки при максимальной температуре.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Передрий, М. А. Антрацит как сырье для получения сорбентов для различных направлений использования / М. А. Передрий, Ю. И. Кураков, В. С. Самофалов // Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедения, технология : материалы 2-й Международной конференции. – Москва : МГУ, 2003. – С. 170.

2. Передерий, М. А. Дробленые и гранулированные сорбенты из антрацита / М. А. Передерий, Ю. И. Кураков, В. С. Самофалов // Химия твердого топлива. – 2004. – № 3. – С. 46-59.

3. Теоретические основы термодинамики и теплопередачи : учеб. пособие /

А. Н. Ларионов, Ю. И. Кураков, В. С. Воищев [и др.]. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2015. – 199 с.

4. Маликов, И. Н. Углеродные сорбенты для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов / И. Н. Маликов, Ю. И. Кураков, М. А. Передрий // Актуальные проблемы нефтехимии : материалы II Всероссийской конференции. – Уфа, 2005. – С. 210.

5. Ларионов, А. Н. Физика : Учеб. пособие (курс лекций) / А. Н. Ларионов, В. П. Шацкий. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. – 320 с.

## REFERENCES

1. Peredriy, M. A. Anthracite as a raw material for obtaining sorbents for various applications / M. A. Peredriy, Yu. I. Kurakov, V. S. Samofalov // Carbon: Fundamental Problems of Science, Materials Science, and Technology : Proceedings of the 2nd International Conference. – Moscow : Moscow State University, 2003. – P. 170.

2. Perederiy, M. A. Crushed and granulated sorbents from anthracite / M. A. Perederiy, Yu. I. Kurakov, V. S. Samofalov // Solid Fuel Chemistry. – 2004. – No. 3. – P. 46-59.

3. Theoretical foundations of thermodynamics and heat transfer : Textbook / A. N. Larionov, Yu. I. Kurakov, V. S. Voishchev [et al.]. – Voronezh : Voronezh State Agrarian University. Emperor Peter the Great, 2015. – 199 p.

4. Malikov, I. N. Carbon Sorbents for Eliminating Oil and Petroleum Product Spills / I. N. Malikov, Yu. I. Kurakov, M. A. Peredriy // Actual Problems of Petrochemistry: Proceedings of the II All-Russian Conference. – Ufa, 2005. – P. 210.

5. Larionov, A. N. Physics: Textbook (Lecture Course) / A. N. Larionov, V. P. Shatsky. – Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 2022. – 320 p.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ КЛЕЕВ

### PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR PHYSICAL MODIFICATION OF POLYMERIC ADHESIVES

**Латынин А.В.**, кандидат технических наук,  
ООО «САТОМС», Воронеж, Россия

**Latynin A.V.**, PhD in Technical Sciences, LL  
«StroyAtomSfera», Voronezh, Russia

**Лушникова Е.Н.**, кандидат технических  
наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова»,  
Воронеж, Россия

**Lushnikova E.N.**, PhD in Technical Sciences,  
Associate Professor, Voronezh State University  
of Forestry and Technologies named after  
G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Швырев А.Н.**, кандидат технических наук,  
доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова»,  
Воронеж, Россия

**Shvyriov A.N.**, PhD in Technical Sciences,  
Docent, Associate Professor, Voronezh State  
University of Forestry and Technologies named  
after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Швырев С.А.**, студент, ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный  
лесотехнический университет имени  
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Shvyriov S.A.**, Student, Voronezh State  
University of Forestry and Technologies named  
after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Тиньков А.А.**, кандидат технических наук,  
доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова»,  
Воронеж, Россия

**Tinkov A.A.**, PhD in Technical Sciences,  
Associate Professor, Voronezh State University  
of Forestry and Technologies named after  
G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье приводятся материалы, доказывающие перспективы технологии направленной модификации полимеров под влиянием внешнего действия физическим полем. Представленное сообщение подробно рассматривает частный случай, в котором изучается воздействие постоянного магнитного поля, возбуждаемого электромагнитом, как основной инструмент воздействия на полимерный состав клеевой композиции находящейся в жидкой фазе. Приводятся основные эксплуатационные характеристики как самой клеевой композиции, так и клеевого соединения на его основе.

**Ключевые слова:** модификация, прочность, вязкость, клей, полимер, напряженность магнитного поля, клеевое соединение, субстрат, адгезив.

**Abstract.** This article presents evidence demonstrating the potential of targeted polymer modification technology under the influence of an external physical field. This paper examines in detail a specific case, studying the effect of a constant magnetic field generated by an electromagnet as the primary tool for influencing the polymer composition of an adhesive composition in the liquid

phase. The article provides the main performance characteristics of both the adhesive composition itself and the adhesive joint based on it.

**Keywords:** modification, strength, viscosity, adhesive, polymer, magnetic field strength, adhesive joint, substrate, adhesive.

Быт современного человека окружен большим количеством вещей, обеспечивающих комфорт его существования. Это могут быть как необходимые товары потребления (жилье, одежда, обувь, мебель), так и предметы роскоши (бытовая электронная техника, средства связи, средства передвижения). Соответственно, чем выше уровень технического развития человеческого общества, тем большее количество разнообразных материалов различной природы необходимо для его поддержания. В свою очередь обеспечение такого разнообразия технических изделий и удовлетворения предъявляемых требований к ним невозможно без создания новых материалов и технологий их получения. Одну из таких ролей по созданию новых материалов с комбинированными свойствами можно отдать клеевым соединениям. Клеевые соединения играют критически важную значение в современной жизни человека, являясь неотъемлемой частью как быта, так и высокотехнологичных производств. Благодаря своей универсальности, способности соединять разнородные материалы и обеспечивать прочность, клеи заменили традиционные методы крепления (болты, заклепки, сварку) во многих отраслях. Перед исследователями стоят задачи определения перспективных методов при развитии технологий склеивания, таких как разработка новых материалов [1]; применение высокопрочных конструкционных (структурных) клеев для соединения металлов и композитов, что особенно критично для снижения веса в авиации и автопроме. Перспективы развития связаны с обеспечением надежности швов и автоматизацией процессов подготовки и нанесения клея.

Использование нанотехнологий для улучшения физико-механических свойств клеевых составов – перспективное направление, позволяющее повысить прочность, адгезию, износостойкость и долговечность клеев. Однако этот процесс сопряжен с рядом серьезных научно-технических и производственных проблем [2].

Основными проблемами использования нанотехнологий в клеевых составах являются:

- Агломерация наночастиц: наночастицы склонны к слипанию (агломерации) из-за высокой поверхностной энергии. Это приводит к неоднородности состава, образованию дефектов (центров концентрации напряжений) вместо ожидаемого упрочнения.

- Сложность диспергирования: обеспечить равномерное распределение наночастиц в полимерной матрице клеевого состава крайне сложно и технологически затратно.

- Совместимость наноматериалов с матрицей: для качественного улучшения свойств необходима высокая адгезия между наночастицей и клеевой основой (полимером), чего трудно достичь без предварительной модификации поверхности наночастиц.

- Влияние на реологию: введение наночастиц часто резко повышает вязкость клеевых составов, что затрудняет их нанесение, снижает удобоукладываемость и проникающую способность.

- Изменение времени отверждения: многие нанодобавки ускоряют процесс схватывания, что сокращает время «жизни» клея и мешает технологическому процессу.

- Высокая стоимость: производство и использование наноструктурированных материалов существенно удорожает конечный клеевой продукт.

- Токсикологические и экологические риски: наночастицы способны проникать через биологические барьеры. Отсутствие полных данных о воздействии на здоровье человека и окружающую среду создает проблемы с техникой безопасности при работе с такими составами [3].

Поэтому перед разработчиками ставится наиболее острая задача разработки новых технологий как склеивания, так и получения новых клеев, отвечающих всем современным требованиям.

К таким методам можно отнести методы физической модификации, а именно, магнитное, электрическое, ультразвуковое поле, а также их возможные комбинации. Из перечисленных наиболее отвечающим требованиям безопасности и легкости воспроизведения считается магнитное поле. По этой причине оно и было выбрано авторами предметом исследования. В качестве объекта исследования рассматривался высокопрочный клей ВК-9 на основе эпоксидной и полиамидной смол.

Создание магнитного поля обеспечивалось экспериментальной установкой (рисунок 1), разработанной авторами специально для таких задач [4].

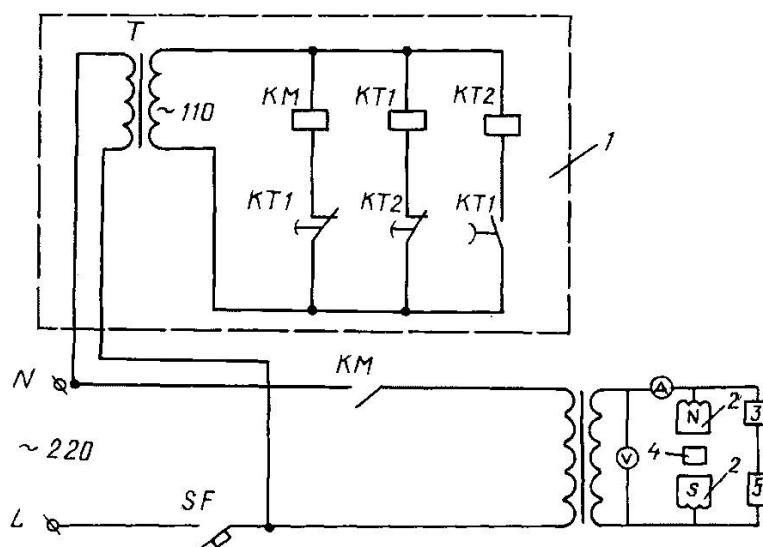


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для создания магнитного поля:

- 1 – блок управления длительностью и скважностью импульсов магнитного поля;
- 2 – электромагнит; 3 – нагревательный элемент; 4 – рабочая ячейка; 5 – мультиметр

Установка позволяет получить постоянное магнитное поле при одновременном нагреве обрабатываемых деталей до необходимой температуры ( $t = 50...200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), различной напряженности магнитного поля  $(0,1...24) \cdot 10^4\text{ А/м}$ .

Устройство для намагничивания содержит блок управления длительностью и скважностью импульсов магнитного поля 1, состоящий из параллельно соединенных реле времени КТ1, КТ2 и пускателя КМ, причем параллельно к блоку управления длительностью и скважностью подключена электрическая цепь из последовательно соединенных

электромагнита 2, амперметра, нагревательного элемента 3 с рабочей ячейкой 4 и мультиметра 5, параллельно подключен к цепи вольтметр.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Между полюсами электромагнита 2 на нагревательный элемент 3 помещается рабочая ячейка 4 с намагничиваемым материалом. Устанавливается необходимое межполюсное расстояние  $L = 25...40$  мм, после чего на обмотку электромагнита подается постоянное напряжение питания до 250 В.

Обработка исследуемых полимерных клеев на установке проводилась в следующем порядке. Полимерный клей или полимерный компонент клея помещался в специальную кювету, выполненную из фторопласта, которая вводилась в рабочее межполюсное пространство для магнитной и ультразвуковой обработки.

Облучение образцов полимерного клея осуществлялось при заданной напряженности и частоте ультразвуковых колебаний строго определенное время, зависящее от задаваемых условий. После завершения обработки модифицированный компонент клея смешивался с отвердителем и наносился на заранее подготовленные поверхности склеиваемых образцов древесины дуба. Отверждение проводилось при нормальных условиях в течении суток. Подготовленные таким образом образцы испытывались на определение предела прочности при скалывании вдоль волокон согласно ГОСТу 15613.1-84.

Испытания по определению предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон проводились на испытательной машине ИР-50-3, общий вид которой представлен на рисунке 2. Полученные результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 3.

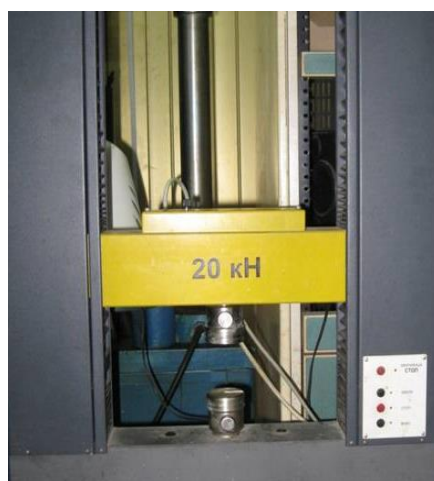


Рисунок 2 – Испытательная машина ИР-50-3

Подвергнутый комбинированному модифицированию клей, затем испытывался в процессе отверждения клеевой прослойки между поверхностями субстратов из древесины на величину внутренних напряжений клеевого шва. Для реализации поставленной задачи разработан метод и создан стенд, в основу функционирования которого заложен, так называемый консольный способ [5], согласно которому производится расчет внутренних напряжений по специально выведенной аналитической зависимости [6]. Используемый метод

определения внутренних напряжений в клеевых прослойках имеет существенное преимущество в сравнении с используемыми в настоящее время способами, которые не позволяют получать данные напряжений по времени.

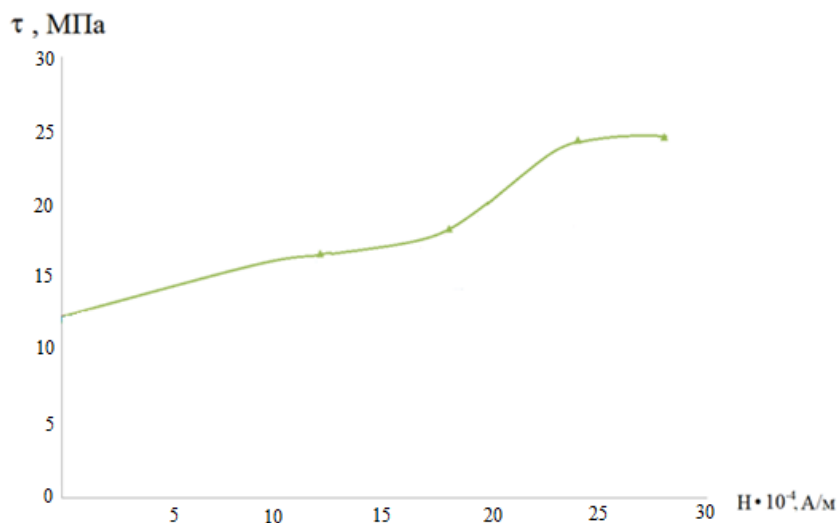


Рисунок 3 – Результаты экспериментальных исследований образцов

Стенд для определения величины внутренних напряжений, формируемых в процессе отверждения модифицированного клея, состоит из рабочей ячейки с консольно закрепленной парой деревянных пластин длиной 10 см и шириной 1 см при соотношении толщин 1:10 и клеевой прослойкой между ними заданной толщины (рисунок 4). Пластины подсоединены к источнику постоянного тока и цифровому прибору, преобразующему аналоговые сигналы в цифровые.

В процессе полимеризации клея в прослойке происходит изгиб свободного конца сборки, что сопровождается изменением емкости рабочей ячейки, имитирующей плоский конденсатор. Изменение емкости конденсатора по мере отверждения клеевой прослойки фиксируется цифровым прибором и передается на вычислительный комплекс.

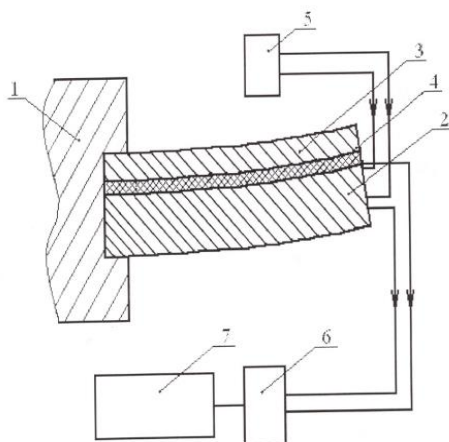


Рисунок 4 – Принципиальная схема узла стенда для определения внутренних напряжений клеевой прослойки: 1 – рабочая ячейка; 2, 3 – пластины; 4 – клеевая прослойка; 5 – источник постоянного тока; 6 – цифровой прибор; 7 – измерительный комплекс

С помощью специальной программы по предложенной в работе [7] формуле осуществляется расчет внутренних напряжений в зависимости от времени.

Результаты, полученные в ходе эксперимента, приводятся в виде графика, представленного на рисунке 5.

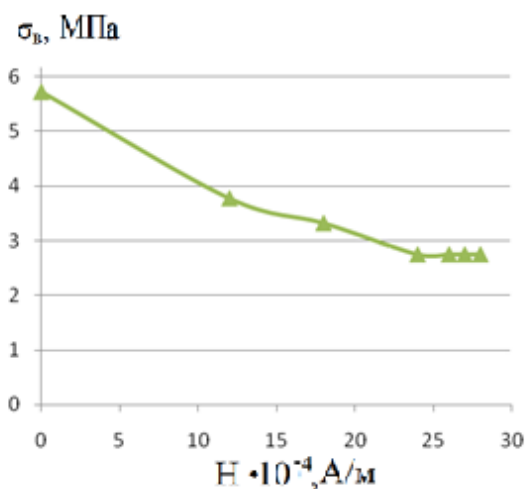


Рисунок 5 – График зависимости внутренних напряжений в клеевых соединениях древесины дуба на основе клея ВК-9 от напряженности магнитного поля

Из анализа графиков на рисунке видно, что в результате обработки физическими полями внутренние напряжения снижаются от 20 до 60 %. Это в свою очередь приводит к увеличению предела прочности клеевых соединений древесины дуба.

На основании анализа исследований, посвященных использованию магнитных полей для модификации клеев, можно сделать следующие выводы:

1. Повышение прочности клеевых соединений: Воздействие магнитного поля на полимерный клей ВК-9 перед склеиванием является эффективным методом повышения прочности клеевых соединений, в частности, в деревообработке.

2. Снижение внутренних напряжений: Магнитообработанные клеи демонстрируют снижение внутренних напряжений в клеевом шве, что напрямую ведет к увеличению эксплуатационной прочности изделий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов, В. М. Интенсивная технология получения клееной древесины повышенной прочности / В. М. Попов, А. В. Иванов // Вестник Московского государственного университета леса-Лесной вестник. – 2007. – № 4. – С. 89-90.

2. Попов, В. М. Влияние магнитного поля на прочность клееной древесины / В. М. Попов, А. В. Иванов, М. А. Шендриков // Вестник Московского государственного университета леса-Лесной вестник. – 2008. – № 6. – С. 80-81.

3. Mechanism by which electric field affects the strength of glue joints / V. M. Popov, A. V. Latynin, M. A. Shendrikov, S. S. Nikulin // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2013. – Vol. 86, No. 4. – P. 599-602.

4. Патент № 2328788 C1 Российская Федерация, МПК H01F 13/00. Устройство для намагничивания : № 2007115746/09 : заявл. 25.04.2007 : опубл. 10.07.2008 / В. М. Попов, А. В. Иванов, В. С. Мурзин, А. П. Новиков, В. В. Шестакова, А. В. Латынин ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежская государственная лесотехническая академия» (ВГЛТА). – 4 с.

5. Патент № 2456586 C1 Российская Федерация, МПК G01N 27/22. Способ определения внутренних напряжений : № 2011109552/28 : заявл. 14.03.2011 : опубл. 20.07.2012 / В. М. Попов, А. В. Иванов, А. П. Новиков, М. А. Шендриков, А. В. Латынин ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежская государственная лесотехническая академия». – 5 с.

6. Попов, В. М. Метод контроля качества композиционных материалов класса «препег» / В. М. Попов, Н. Е. Песков, Е. Н. Лушникова // Дефектоскопия. – 1994. – № 1. – С. 50-51.

7. Иволгин, В. Я. Определение напряжений в клеевом слое, возникающих вследствие усадочных явлений при склеивании металлов / В. Я. Иволгин // Механика полимеров. – 1970. – № 1. – С. 53-57.

## REFERENCES

1. Popov, V. M. Intensive technology for obtaining high-strength glued wood / V. M. Popov, A. V. Ivanov // Bulletin of the Moscow State University of Forests-Lesnoy Vestnik. – 2007. – No. 4. – P. 89-90.

2. Popov, V. M. The influence of a magnetic field on the strength of glued wood / V. M. Popov, A. V. Ivanov, M. A. Shendrikov // Bulletin of the Moscow State University of Forests-Lesnoy Vestnik. – 2008. – No. 6. – P. 80-81.

3. Mechanism by which electric field affects the strength of glue joints / V. M. Popov, A. V. Latynin, M. A. Shendrikov, S. S. Nikulin // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2013. – Vol. 86, No. 4. – P. 599-602.

4. Patent No. 2328788 C1, Russian Federation, IPC H01F 13/00. Device for magnetisation : No. 2007115746/09 : filed on 25.04.2007 : published on 10.07.2008 / V. M. Popov, A. V. Ivanov, V. S. Murzin, A. P. Novikov, V. V. Shestakova, A. V. Latynin ; Applicant State Educational Institution of Higher Professional Education Voronezh State Forestry Academy (VGLTA). – 4 p.

5. Patent No. 2456586 C1, Russian Federation, IPC G01N 27/22. Method of Determining Internal Stress : No. 2011109552/28 : Appl. 14.03.2011 : Publ. 20.07.2012 / V. M. Popov, A. V. Ivanov, A. P. Novikov, M. A. Shendrikov, A. V. Latynin ; Applicant State Educational Institution of Higher Professional Education Voronezh State Forestry Academy. – 5 p.

6. Popov, V. M. The method of quality control of composite materials of prepreg type / V. M. Popov, N. E. Peskov, E. N. Lushnikova // Defectoscopy. – 1994. – No. 1. – P. 50-51.

7. Ivolgin, V. Ya. Determination of Stresses in the Adhesive Layer Arising Due to Shrinkage Phenomena in Metal Bonding / V. Ya. Ivolgin // Polymer Mechanics. – 1970. – No. 1. – P. 53-57.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РОСТА ВТОРОСТЕПЕННЫХ (ПОБОЧНЫХ) ДРЕВЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ И ОБЪЕКТОВ В ДРЕВОСТОЯХ

### MODELING THE GROWTH DYNAMICS OF SECONDARY WOODY PLANTINGS AND OBJECTS IN FOREST STANDS

**Лисицын В.И.**, кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Lisitsyn V.I.**, PhD in Physics and Mathematics, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Матвеев Н.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Matveev N.N.**, DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Евсикова Н.Ю.**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Evsikova N.Yu.**, PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Камалова Н.С.**, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Kamalova N.S.**, PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Внукова С.В.**, кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Vnukova S.V.**, PhD in Physics and Mathematics, Acting Head of the Electrical Engineering, Thermal Engineering and Hydraulics Department, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос о применении биомассы отходов лесохозяйственной деятельности в виде подлеска и ветвей в качестве сырья для производства гранул – пеллет в качестве возобновляемого биотоплива. Для исследования динамики роста элементов биомассы древостоя – подлеска (подроста) и ветвей применена эколого-физиологическая модель. Показано, что эколого-физиологическая модель может быть использована для оценки количества отходов лесохозяйственной деятельности в лесных насаждениях. В качестве

примера для расчета динамики роста биомассы древостоя использовалось порослевое дубовое насаждение первого бонитета для Центрально-Черноземного района Европейской России.

**Ключевые слова:** возобновляемое биотопливо, пеллеты, порослевое дубовое насаждение, эколого-физиологическая модель, подлесок, подрост, сучья.

**Abstract.** The article examines the using of forestry waste biomass (undergrowth and branches) as a feedstock for the production of pellets as a renewable biofuel. The ecological-physiological model has used to study the growth dynamics of stand biomass elements-undergrowth (young growth) and branches. It has shown that the ecological-physiological model can be used to estimate the amount of forestry waste in forest stands. A coppice oak stands of the first quality class in the Central Black Earth Region of European Russia have used as an example to calculate the growth dynamics of stand biomass.

**Keywords:** renewable biofuel, pellets, oak coppicing, ecological-physiological model, undergrowth, young growth, branches.

Для максимального использования биомассы в энергетических целях существуют различные варианты ее преобразования в биотопливо с помощью процессов термохимической конверсии, один из которых – производство из побочных продуктов древесины гранул – пеллет [1], что способствует снижению зависимости от ископаемых видов топлива. В настоящее время пеллеты считаются перспективным эффективным экологически чистым возобновляемым источником энергии и представляют собой вид продукции из древесины в форме прессованных гранул цилиндрической формы небольшого размера, производимых из отходов от основной продукции деревопереработки (опилок, щепы, обрезов, некондиционных лесоматериалов), размельченных до состояния порошка. В настоящей работе предлагается в качестве сырья для пеллет использовать побочные типы биомассы, включающие фитомассу ветвей и нижних ярусов растительности (напочвенный покров, подрост, подлесок) в виде отпада, образующегося в процессе роста древостоя. Например, в дубовых древостоях первого бонитета отпад достигает максимального значения в возрасте древостоя 50 лет и равен 3,3 т/(га·год) при единичной полноте. При уменьшении полноты до 0,4 отпад возрастает до 4,4 т/(га·год) [2].

Данные для величины биологической продуктивности, приведенные в монографиях В. А. Усольцева [3, 4], и сведения о биомассе отпада древостоя в зависимости от полноты и бонитета для побочных видов насаждения из работы А. З. Швиденко [2] позволяют обоснованно предполагать, что каждые пять лет возможно использование этих видов как сырья для производства пеллет. Так, на основе таблиц хода роста дубового древостоя первого бонитета [3] можно заключить, что для древостоев, достигших возраста 50 лет, величина отпада за пять лет составляет от 16,5 т/га до 22 т/га, это соответствует 5 %-6,5 %. Входящий в отпад сухой подлесок и ветвей, который вполне можно использовать для производства гранул – пеллет, за 5 лет будет равен 2,15 т/га – 2,77 т/га. Кроме ветвей и подлеска можно использовать для производства пеллет и стволую древесину, которая вышла из сортамента.

В таблице 1 (согласно принятой классификации и градации (ГОСТ 3243-88)) представлены значения удельной объемной теплоты сгорания (объемной теплотворности  $q$ )

дров, изготовленных из различных пород древесины, величина которой влияет на эффективность биотоплива.

Таблица 1 – Объемная теплотворность дров при влажности древесины 20 % [5]

Порода дерева	Объемная удельная теплотворная способность дров, МДж/м <sup>3</sup>
береза	5816-9379
бук	5276-8931
ясень	5874-9186
граб	6925-8994
ильм	5368-9802
вяз	5368-9802
клен	6293-9534
дуб	6400-10170
лиственница	4539-9241
сосна	5368-8918
ольха	4698-7302
ель	4472-8265
кедр	5493-9366
пихта	4472-8265
осина	4195-7239
липа	4380-7432
тополь	3515-5736
ива	4723-7704

Сравнительный анализ средней величины  $q$  (см. рисунок 1) показывает, что максимальное количество тепла выделяется при сгорании дров, изготовленных из древесины граба и дуба. Поскольку в России преимущественный ареал произрастания граба – это юг и запад европейской части, то в Центрально-Черноземном регионе (ЦЧР) целесообразно рассматривать в качестве перспективного сырья для производства пеллет древесину дуба.

В работах [6, 7] была представлена эколого-физиологическая модель (ЭФМ) динамики роста древостоев для оценки биомассы насаждения в целом. С помощью этой модели исследовалась динамика прироста древостоев с учетом различных пород и бонитетов (условий произрастания). В результате было убедительно показано, что ЭФМ хорошо описывает динамику количественных характеристик прироста древостоев, а параметры модели имеют ясный физический смысл и конкретное лесоводческое содержание. Поскольку систематические данные по моделированию динамики роста биомассы побочных продуктов лесохозяйственной деятельности (ветвей, подроста, подлеска) в настоящее время практически отсутствуют, то в приведенном исследовании предлагается применить ЭФМ для решения этой проблемы.

Известно, что порослевые насаждения дуба вырастают гораздо быстрее нежели семенные, что важно для ускорения процессов возобновления биоресурсов. Поэтому в работе в качестве объекта исследования были выбраны порослевые древостои дуба ЦЧР России.

Таким образом, целью настоящего исследования является использование эколого-физиологической модели для оценки динамики биомассы побочных продуктов порослевых дубовых насаждений ЦЧР России.

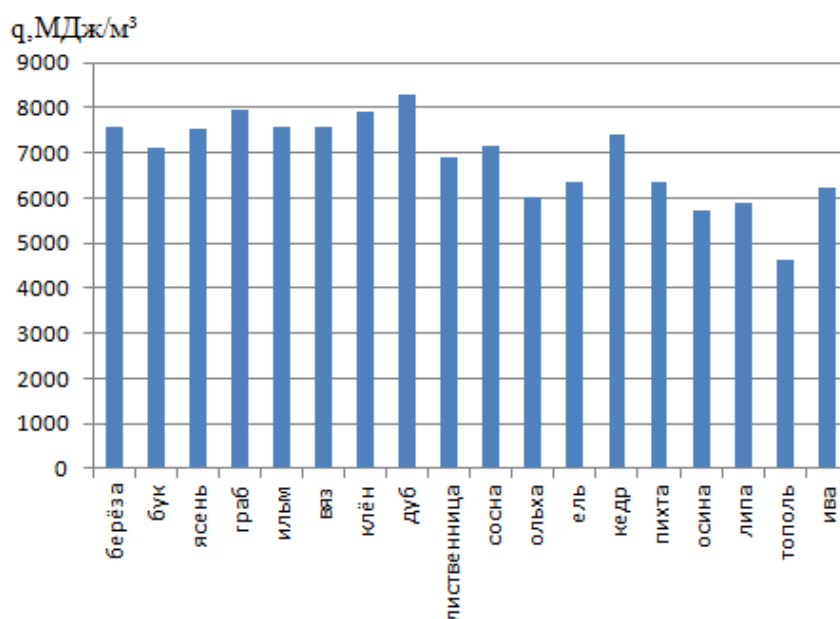


Рисунок 1 – Средняя величина объемной теплотворности  $q$  (МДж/м³) древесины различных пород

Исходные данные о биологической продуктивности сомкнутых порослевых дубовых насаждений в лесостепи ЦЧР Европейской России были взяты из монографии В. А. Усольцева [3] и приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Динамика роста биомассы сомкнутых порослевых насаждений дуба в лесостепи ЦЧР Европейской России (N – число деревьев на гектар, M1 – биомасса подлеска в тоннах на гектар, M2 – биомасса ветвей (листьев) в тоннах на гектар)

Возраст древостоя, лет	N, дер./га	M1, т/га	M2, т/га
10	9675	0,63	7,7
15	4648	0,97	11,8
20	3002	1,24	16,3
25	2145	1,49	20,8
30	1556	1,74	25,3
35	1225	1,95	29,5
40	982	2,16	33,5
45	823	2,33	37,0
50	698	2,50	40,4
55	604	2,66	43,7
60	529	2,82	46,9
65	466	2,98	50,0
70	419	3,13	52,8
75	381	3,26	55,5
80	348	3,38	58,2
85	321	3,51	60,5
90	298	3,64	62,5
95	279	3,76	64,5
100	264	3,84	66,4

В ЭФМ для описания динамики роста используются 4 параметра, подлежащие определению в процессе оптимизации [6, 7]. При этом выражающий связь биомассы с поверхностью особи аллотропический параметр модели  $q$  и дающий удельную скорость расхода ресурса в уравнении Бергаланффи [8] параметр  $r$  в ЭФМ приобретают еще и лесоводческий смысл:  $q$  является индексом породы,  $r$  – индексом бонитета нахождения. Варьируемые параметры  $m_{\infty}$  и  $N_{\infty}$  определяются величиной биомассы отдельной особи и числом деревьев на гектар при максимально возможном времени исследования древостоя. В результате вычислительного эксперимента для выбранного порослевого древостоя индекс породы оказался равным  $q = 0,74$ , а индекс  $r = 0,05$ , что соответствует первому бонитету насаждения. В таблице 3 представлены параметры ЭФМ, полученные для расчета динамики роста биомассы подлеска и ветвей, и величины критерия Нэша-Сатклиффа [9], который обычно используется в экологических моделях. Если значения этого критерия отрицательны, то модель не пригодна для применения, если они превышают 0,9, то можно говорить о высокой точности соответствия модели эмпирическим данным.

Таблица 3 – Значения параметров ЭФМ для биомассы подлеска и биомассы ветвей и значения критерия Нэша-Сатклиффа  $ME_N$ ,  $ME_M$  и  $ME_m$

Вид, используемой в расчетах биомассы	$q$	$r$	$m_{\infty}$ , тонн	$N_{\infty}$ , дер./га	$ME_N$	$ME_M$	$ME_m$
Ветви	0,74	0,05	0,79	73	0,9603	0,9406	0,9994
Подлесок	0,74	0,05	0,045	69	0,9613	0,9366	0,9996

Результаты расчетов для динамики биомассы подлеска  $M1$  и биомассы ветвей  $M2$  (в тоннах на га) по ЭФМ представлены сплошными кривыми на рисунках 2а и 2б в сравнении с эмпирическими данными, которые обозначены синими прямыми с прямоугольниками на концах. Аналогичные зависимости были получены для полной биомассы указанного древостоя и опубликованы в материалах Международного лесного форума [10].

На рисунке 3 показаны эмпирическая (обозначена синими прямыми с прямоугольниками на концах) и рассчитанная по ЭФМ (сплошная кривая) зависимости от времени для числа  $N$  деревьев на гектар.

Соответствие модельных (сплошных) кривых динамики приходящейся на 1 дерево биомассы подлеска  $m1$  и биомассы ветвей  $m2$  (в тоннах) эмпирическим данным (синие прямые с прямоугольниками на концах) представлено на рисунках 4а и 4б.

Совпадение значений параметров ЭФМ  $q$  и  $r$  для полной биомассы насаждения, биомассы ветвей и биомассы подлеска свидетельствует о том, что у них одинаковая динамика роста. Поэтому оценка фитомассы фрагментов насаждения, приведенная в начале работы вполне обоснована и фитомассу подлеска и ветвей вполне можно использовать в качестве возобновляемого сырья для производства пеллет.

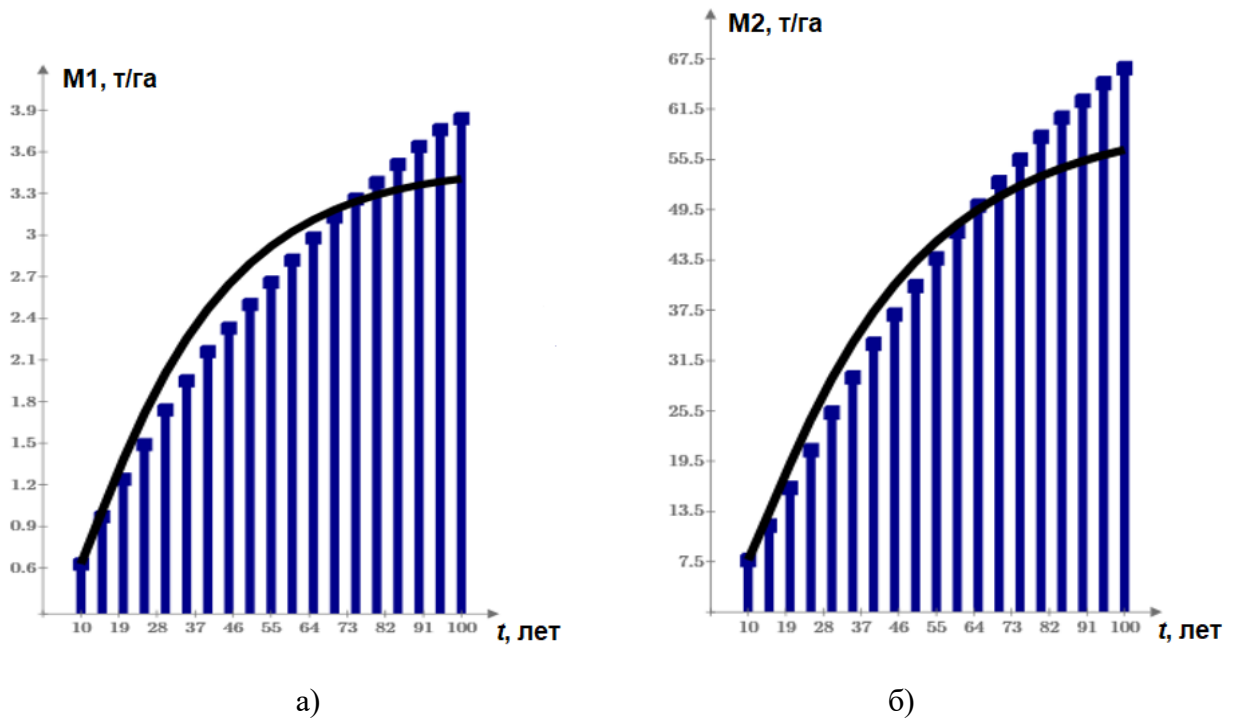


Рисунок 2 – Динамика биомассы подлеска М1 (а) и биомассы ветвей М2 (б)

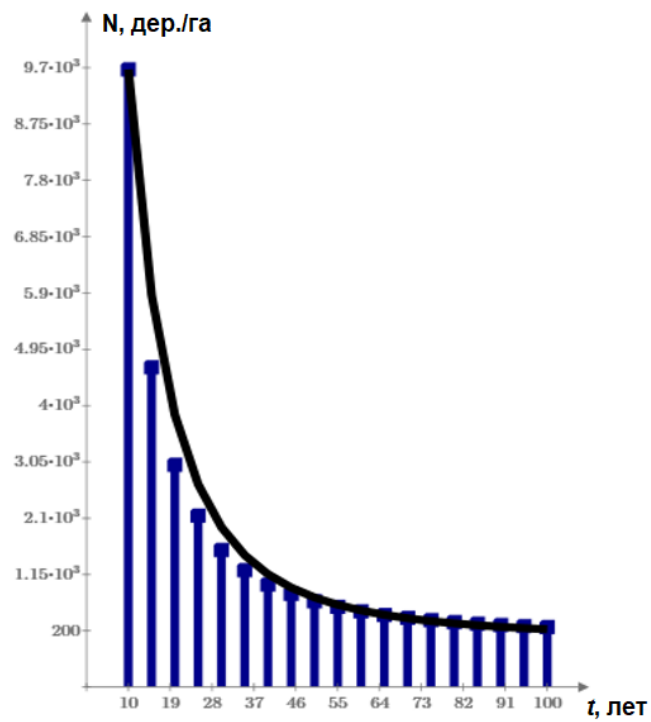


Рисунок 3 – Зависимость числа деревьев на гектар от времени

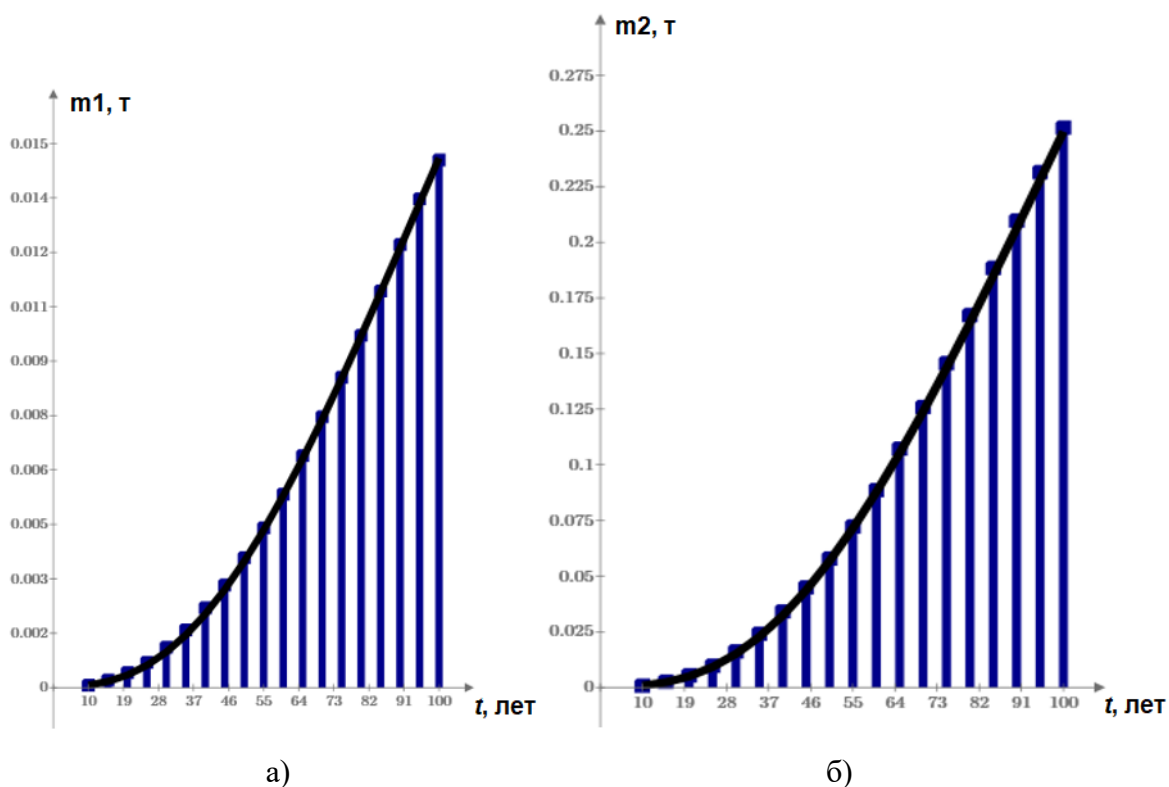


Рисунок 4 – Динамика приходящейся на 1 дерево биомассы подлеска  $m_1$  (а) и биомассы ветвей  $m_2$  (б)

В заключении можно сделать следующие выводы.

1. Эколого-физиологическая модель может быть применена не только для исследования динамики роста полной биомассы древостоев дуба, но и для описания динамики роста подвидов биомассы: подлеска, ветвей и т. д.
2. Фрагменты полной биомассы имеют динамику роста, аналогичную полной биомассе насаждения, что выражается в одинаковых значениях индексов породы и индексов бонитета насаждения.
3. При оптимальном ведении лесохозяйственных мероприятий без ущерба для функционирования лесных насаждений возможно получать в качестве сырьевой базы отходы лесопользования в виде ветвей, подлеска (подроста).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шведов, Д. К. Характеристики зажигания и горения пеллетированных топлив из биомассы / Д. К. Шведов, В. В. Дорохов, Г. С. Няшина // Проблемы геологии и освоения недр : Труды XXVIII Международного молодежного научного симпозиума имени академика М.А. Усова, посвященного 125-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева и 130-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова, Томск, 01-05 апреля 2024 года. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 233-234.
2. Таблицы и модели роста и биологической продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) /

А. З. Швиденко, Д. Г. Щепашенко, С. Нильсон, Ю. И. Булуй; Изд. 2-е. – Москва: Рослесхоз, Международный институт прикладного системного анализа, 2008. – 886 с.

3. Усольцев, В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии / В. А. Усольцев. – Екатеринбург: Издательство УрО РАН, 2002. – 763 с.

4. Усольцев, В. А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии : [монография : электронная база данных] / В. А. Усольцев ; Российская академия наук, Уральское отделение, Ботанический сад. – 4-е дополненное электронное издание. – Екатеринбург, 2023. – URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452> (дата обращения: 05.03.2026).

5. Инженерный справочник. Таблицы DPVA.ru. – URL: <https://dpva.ru/guide/guidephysics/guidephysicsheatandtemperature/comnustionenergy/woodwetdrycombustion/> (дата обращения: 05.03.2026).

6. Лисицын, В. И. Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода / В. И. Лисицын, М. В. Драпалюк, Н. Н. Матвеев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – № 3(387). – С. 213-225.

7. Сравнительный анализ хвойных древостоев регионов Северной Евразии в рамках эколого-физиологической модели / В. И. Лисицын, Н. Н. Матвеев, Н. Ю. Евсикова, Н. С. Камалова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15, № 4(60). – С. 146-161.

8. Bertalanffy, L. von. Biophysik des Fließgleichgewichts / L. von Bertalanffy. – Vieweg, Braunschweig, 1953. – 60 p.

9. Nash, J. E. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles / J. E. Nash, J. V. Sutcliffe // Journal of Hydrology. – 1970. – Vol. 10, Iss. 3. – P. 282-290.

10. Особенности эколого-физиологического (аналитического) моделирования насаждений дуба (*Quercus*) на примере локальных таблиц хода роста в плане возобновления лиственных лесов / В. И. Лисицын, Н. Н. Матвеев, Н. Ю. Евсикова, Н. С. Камалова // Лесное хозяйство в условиях глобальных вызовов: новые парадигмы устойчивого развития. Forestry – 2025 : материалы Международного лесного форума, приуроченного к празднованию 95-летия ВГЛТУ, Воронеж, 30 сентября 2025 г. / отв. ред. Яковенко Н. В. ; ВГЛТУ. – Воронеж, 2025. – С. 90-99.

## REFERENCES

1. Shvedov, D. K. Ignition and combustion characteristics of pelletized biomass fuels / D. K. Shvedov, V. V. Dorokhov, G. S. Nyashina // Problems of Geology and Subsoil Development: Proceedings of the XXVIII International Youth Scientific Symposium named after Academician M.A. Usov, dedicated to the 125th anniversary of the birth of Academician of the USSR Academy of Sciences, Professor K.I. Satpayev and the 130th anniversary of the birth of Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences, Professor F.N. Shakhov, Tomsk, April 1-5, 2024. – Tomsk : National Research Tomsk Polytechnic University, 2024. – P. 233-234.

2. Tables and models of growth and biological productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia (regulatory and reference materials) / A. Z. Shvidenko, D. G. Shchepaschenko, S. Nilsson, Yu. I. Buluy; 2nd Ed. – Moscow : Rosleskhoz, International Institute for Applied System Analysis, 2008. – 886 p.

3. Usoltsev, V. A. Forest phytomass in Northern Eurasia: standards and geographic elements / V. A. Usoltsev. – Ekaterinburg: Publishing house of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. – 763 p.
4. Usoltsev, V. A. Biomass and primary production of Eurasian forests: [monograph: electronic database] / V. A. Usoltsev; Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Botanical Garden. – 4th supplemented electronic edition. – Ekaterinburg, 2023. – URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452> (date of access: 05.03.2026)
5. Engineering Handbook. Tables DPVA.ru. – URL: <https://dpva.ru/guide/guidephysics/guidephysicsheatandtemperature/comnustionenergy/woodwetdrycombustion/> (date of access: 05.03.2026)
6. Lisitsyn, V. I. Modeling the dynamics of tree stand growth based on the thermodynamic approach / V. I. Lisitsyn, M. V. Drapalyuk, N. N. Matveev // News of higher educational institutions. Forestry journal. – 2022. – No. 3(387). – P. 213-225.
7. Comparative analysis of the Northern Eurasia regions coniferous forest stands within the framework of the ecological-physiological model / V. I. Lisitsyn, N. N. Matveev, N. Yu. Evsikova, N. S. Kamalova // Forestry Engineering journal. – 2025. – Vol. 15, No. 4(60). – P. 146-161.
8. Bertalanffy, L. von. Biophysik des Fließgleichgewichts / L. von Bertalanffy. – Vieweg, Braunschweig, 1953. – 60 p.
9. Nash, J. E. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles / J. E. Nash, J. V. Sutcliffe // Journal of Hydrology. – 1970. – Vol. 10, Iss. 3. – P. 282-290.
10. Features of ecological and physiological (analytical) modeling of oak (*Quercus*) plantations using the example of local growth tables in terms of deciduous forest restoration / V. I. Lisitsyn, N. N. Matveev, N. Yu. Evsikova, N. S. Kamalova // Forestry in the context of global challenges: new paradigms of sustainable development. Forestry – 2025: materials of the International Forestry Forum dedicated to the celebration of the 95th anniversary of VSTU, Voronezh, September 30, 2025 / ed. Yakovenko N. V.; VSTU. – Voronezh, 2025. – P. 90-99.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ С СЕТЧАТЫМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ

EXPERIMENTAL STUDY OF CONTACT THERMAL RESISTANCE IN DISSIMILAR  
METALS JOINTS WITH MESH FILLERS

**Лушникова Е.Н.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Lushnikova E.N.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Тиньков А.А.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Tinkov A.A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Внукова С.В.**, кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Vnukova S.V.**, PhD in Physics and Mathematics, Acting Head of the Electrical Engineering, Thermal Engineering and Hydraulics Department, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментального исследования контактного термического сопротивления (КТС) в разъемных соединениях из разнородных металлов (сплав Д16Т-сталь 30) с заполнителями различной природы и геометрии. Эксперименты выполнены в диапазоне контактных давлений 0,1-2,5 МПа и температур 338-473 К. В качестве заполнителей использованы асбестовый лист, а также сетки из углеродистой стали, нержавеющей стали и латуни. Установлено, что применение мелкоячеистых сеток из нержавеющей стали позволяет повысить КТС в 10,4 раза по сравнению с непосредственным контактом. Выявлено влияние оксидных пленок и геометрических параметров сетки на термическое сопротивление. Предложен безразмерный комплекс для сравнительной оценки эффективности заполнителей. Полученные данные могут быть использованы при проектировании теплонагруженных узлов энергетического оборудования.

**Ключевые слова:** контактное термическое сопротивление, разнородные металлы, сетчатый заполнитель, теплопередача, теплоэнергетика, терморегулирование.

**Abstract.** The article presents the results of an experimental study of the contact thermal resistance (CTR) in detachable joints made of different metals (D16T alloy-steel 30) with fillers of

various nature and geometry. The experiments were performed in the range of contact pressures of 0.1-2.5 MPa and temperatures of 338-473 K. As fillers, asbestos sheet and carbon steel, stainless steel, and brass mesh were used. It has been established that the use of fine-mesh stainless steel grids increases the thermal resistance by a factor of 10.4 compared to direct contact. The influence of oxide films and the geometric parameters of the grid on the thermal resistance has been identified. A dimensionless complex has been proposed for the comparative evaluation of the effectiveness of fillers. The obtained data can be used in the design of heat-loaded components of energy equipment.

**Keywords:** contact thermal resistance, dissimilar metals, mesh filler, heat transfer, thermal power engineering, thermal control.

В современной теплоэнергетике, авиационном двигателестроении и космической технике важнейшей задачей является обеспечение эффективного теплового режима работы узлов и агрегатов. Разъемные соединения элементов из разнородных металлов широко распространены в конструкциях теплообменных аппаратов, корпусов энергетических установок, креплений тепловыделяющих элементов и систем термостатирования. При этом тепловые потоки через зоны контакта часто определяют надежность и ресурс работы изделия в целом.

Актуальность настоящего исследования обусловлена устойчивой тенденцией к повышению единичной мощности энергетических установок, что неизбежно ведет к росту плотности тепловых потоков через узлы соединений и требует точного прогнозирования и управления контактным термическим сопротивлением. В условиях санкционных ограничений и политики импортозамещения особую значимость приобретает создание собственной базы данных по теплофизическим характеристикам перспективных отечественных материалов и наполнителей для использования в инженерных расчетах. Кроме того, для ряда практических применений, таких как криогенная техника, теплозащита высокотемпературных агрегатов и термостатирование прецизионного оборудования, требуется не снижение, а целенаправленное повышение контактного термического сопротивления в зонах раздела. Наконец, переход к цифровому проектированию и созданию цифровых двойников энергетических объектов невозможен без верифицированных математических моделей контактного теплообмена для различных сочетаний конструкционных материалов.

Несмотря на значительный объем исследований, выполненных в области контактного теплообмена [1-3], большинство работ посвящено либо однородным материалам, либо условиям высоких контактных давлений, характерным для жестких неразъемных соединений. Соединения разнородных металлов, работающие в условиях малых усилий прижима (до 2,5 МПа) и переменных температур, исследованы недостаточно. Введение в зону контакта малотеплопроводных прокладок-наполнителей является технологичным способом управления тепловым потоком [4-8], однако требует экспериментального обоснования для конкретных сочетаний материалов, что и определяет направленность настоящей работы.

Цель работы – экспериментальное определение зависимостей контактного термического сопротивления от давления сжатия и температуры для разъемных соединений из разнородных металлов (Д16Т-сталь 30) с наполнителями различной природы и геометрии

для последующего использования при проектировании теплонагруженных узлов энергетического оборудования.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, описанном в работе [6]. Образцы контактной пары изготавливались из алюминиевого сплава Д16Т ( $\lambda = 164$  Вт/(м·К) при 293 К) и стали 30 ( $\lambda = 48$  Вт/(м·К) при 293 К). Контактные поверхности шлифовались до шероховатости  $R_z \approx 3,3$  мкм. Нагружение образцов осуществлялось в диапазоне давлений 0,1-2,5 МПа. Температура в зоне контакта поддерживалась на уровнях 338 К, 403 К и 473 К с точностью  $\pm 1,5$  К. Тепловой поток создавался нагревателем и измерялся с помощью дифференциальных термопар.

В качестве заполнителей использовались: асбестовый лист ( $\delta = 0,43$  мм) – в качестве эталонного теплоизолятора; сетка из углеродистой стали ( $\delta = 0,75$  мм, ячейка 1,0×1,0 мм, диаметр проволоки 0,3 мм) с естественной оксидной пленкой и после обработки органическим растворителем; сетка из нержавеющей стали 12Х18Н10Т ( $\delta = 0,13; 0,39; 0,88$  мм, ячейка от 0,05×0,05 мм до 1,0×1,0 мм); сетка латунная Л80 ( $\delta = 0,19; 0,60$  мм, ячейка от 0,05×0,05 мм до 0,5×0,5 мм).

КТС рассчитывалось как отношение перепада температур в зоне контакта к плотности теплового потока. Погрешность измерения КТС не превышала 8 %.

В таблице 1 представлены значения КТС для фиксированного давления  $P = 1,0$  МПа при различных температурах. Для количественной оценки эффективности заполнителя введен коэффициент  $\eta = \frac{R_{пр}}{R_0}$ , где  $R_{пр}$  – КТС с заполнителем;  $R_0$  – КТС при непосредственном контакте.

коэффициент  $\eta = \frac{R_{пр}}{R_0}$ , где  $R_{пр}$  – КТС с заполнителем;  $R_0$  – КТС при непосредственном контакте.

Таблица 1 – Контактное термическое сопротивление ( $R \cdot 10^4$ , м<sup>2</sup>·К/Вт) для пары Д16Т-сталь 30 при  $P = 1,0$  МПа

№	Тип заполнителя	$\delta$ , мм	Размер ячейки, мм	$T$ , К			$\eta$ (338 К)
				338	403	473	
-	Непосредственный контакт	-	-	1,20	1,02	0,86	1,00
1	Асбестовый лист	0,43	-	5,81	5,23	4,52	4,84
2	Сетка стальная (оксидированная)	0,75	1,0×1,0	7,53	6,82	6,03	6,28
3	Сетка стальная (очищенная)	0,75	1,0×1,0	6,24	5,71	5,12	5,20
4	Сетка нержавеющая	0,88	1,0×1,0	8,14	7,43	6,54	6,78
5	Сетка нержавеющая	0,39	0,5×0,5	10,23	9,34	8,23	8,53
6	Сетка нержавеющая	0,13	0,05×0,05	12,52	11,43	10,14	10,43
7	Сетка латунная	0,60	0,5×0,5	8,52	7,82	6,94	7,10
8	Сетка латунная	0,19	0,05×0,05	9,84	9,03	8,12	8,20

Из таблицы 1 видно, что все исследованные сетчатые наполнители обеспечивают более высокие значения КТС по сравнению с листовым асбестом. Максимальная эффективность ( $\eta = 10,43$ ) достигнута при использовании мелкоячеистой сетки из нержавеющей стали толщиной 0,13 мм с размером ячейки 0,05×0,05 мм.

Уменьшение размера ячейки с 1×1 мм до 0,05×0,05 мм при сохранении материала наполнителя увеличивает КТС в 1,5-1,6 раза. Данный эффект объясняется ростом числа последовательных тепловых сопротивлений в системе «металл-воздушный зазор-металл» при многоконтактной структуре сетки, а также увеличением эффективной длины пути теплового потока.

Наличие оксидной пленки на поверхности проволоки стальной сетки повышает КТС на 17-21 % (сравнение позиций 2 и 3 таблицы 1), что связано с низкой теплопроводностью оксидов железа ( $\lambda_{\text{оксида}} \approx 0,1-0,2$  Вт/(м·К) против  $\lambda_{\text{стали}} \approx 45-50$  Вт/(м·К)).

Сетки из нержавеющей стали демонстрируют более высокие значения КТС по сравнению с латунными при аналогичных геометрических параметрах, что коррелирует с более низкой теплопроводностью нержавеющей стали ( $\lambda_{12Х18Н10Т} \approx 15$  Вт/(м·К) против  $\lambda_{\text{Л80}} \approx 110$  Вт/(м·К)).

Для всех типов наполнителей зафиксировано снижение КТС при повышении температуры контакта от 338 К до 473 К. Относительное уменьшение сопротивления составляет 14-19 %. Данный эффект обусловлен увеличением коэффициента теплопроводности воздуха в микрозазорах и ростом теплопроводности материала сеток с температурой.

Для обобщения экспериментальных данных и возможности их использования в инженерных расчетах применен безразмерный комплекс [2]:

$$K = \frac{R_{\text{нр}} / \delta}{R_0 / \Delta}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – толщина наполнителя;  $\Delta$  – эквивалентная толщина межконтактного зазора при непосредственном контакте, определяемая по профилограммам поверхностей (для данной пары  $\Delta = 12,5$  мкм).

Расчетные значения  $K$  для исследованных наполнителей при  $T = 473$  К и  $P = 1,0$  МПа приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения безразмерного комплекса  $K$

Заполнитель	Асбест	Сетка н/ж №4	Сетка н/ж №5	Сетка н/ж №6
$K$	2,84	3,98	5,12	6,35

Возрастание  $K$  с уменьшением размера ячейки свидетельствует о росте удельного термического сопротивления единицы толщины наполнителя. Физически это означает увеличение эффективной длины пути теплового потока в сложной топологии контакта. Для мелкоячеистой сетки (№6) значение  $K = 6,35$  показывает, что один миллиметр такой сетки эквивалентен по термическому сопротивлению 6,35 мм воздушного зазора при непосредственном контакте.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования позволяют сформулировать следующие основные выводы.

Экспериментально подтверждена возможность повышения контактного термического сопротивления в разъемных соединениях из разнородных металлов (Д16Т-сталь 30) до 10,4 раза путем введения в зону контакта мелкоячеистых сетчатых заполнителей из нержавеющей стали.

Установлены количественные зависимости КТС от геометрических параметров сетки (толщина, размер ячейки), материала заполнителя, состояния поверхности, температуры и контактного давления в диапазоне, характерном для слабонагруженных узлов энергетического оборудования.

Определен оптимальный тип заполнителя для задач теплоизоляции – сетка из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 0,13 мм с размером ячейки 0,05×0,05 мм, обеспечивающая максимальные значения КТС во всем исследованном диапазоне температур (338-473 К) и нагрузок (0,1-2,5 МПа).

Предложенный безразмерный комплекс  $K$  позволяет проводить сравнительную оценку эффективности заполнителей и может быть использован при проектировании узлов с заданными теплофизическими характеристиками.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при проектировании теплонагруженных узлов энергетических установок, криогенных систем, теплозащитных экранов и креплений высокотемпературных агрегатов, где требуется повышенное термическое сопротивление в зонах разъемных соединений разнородных материалов. Сформированная база данных позволяет обоснованно выбирать тип и геометрию заполнителя для достижения требуемых теплоизоляционных свойств в зависимости от рабочих температур и контактных давлений. Результаты могут быть использованы для верификации математических моделей контактного теплообмена и создания библиотек материалов для САЕ-систем, применяемых при проектировании современного энергетического оборудования. Выявленные закономерности могут быть экстраполированы на перспективные изделия, создаваемые методами аддитивных технологий с решетчатой внутренней структурой, топологически аналогичной исследованным сетчатым заполнителям.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демкин, Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей / Н. Б. Демкин. – Москва : Издательство АН СССР, 1962. – 112 с.
2. Mesnyankin, S. Y. Solid-solid thermal contact problems: Current understanding / S. Y. Mesnyankin, A. G. Vikulov, D. G. Vikulov // Physics-Uspekhi. – 2009. – Vol. 52, No. 9. – P. 891-914.
3. Шлыков, Ю. П. Контактное термическое сопротивление / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин, С. Н. Царевский. – Москва : Энергия, 1977. – 328 с.
4. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов : [Сборник статей] : Пер. с англ. / Под ред. Д. Лукаса ; Под ред. [и с предисл.] д-ра техн. наук Н. А. Анфимова. – Москва : Мир, 1974. – 543 с.

5. Флетчер, Л. С. Коэффициент контактного термического сопротивления некоторых материалов с низкой теплопроводностью, применяемых в качестве заполнителей межконтактного промежутка / Л. С. Флетчер, П. А. Смуда, Д. А. Гайорог // Ракетная техника и космонавтика. – 1969. – Т. 7, № 7. – С. 107-110.

6. Теплообмен через тонкослойные прослойки в зоне контакта металлических поверхностей / В. М. Попов, О. Л. Ерин, А. П. Новиков, И. Ю. Кондратенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 6. – С. 37-39.

7. Попов, В. М. Термосопротивление контактного слоя с заполнителями между металлическими поверхностями / В. М. Попов, А. П. Новиков, О. Л. Ерин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1. – С. 185.

8. Контактный теплообмен в соединениях с малотеплопроводными заполнителями / В. М. Попов, О. Л. Ерин, А. А. Тиньков, А. Н. Швырев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 2. – С. 95-97.

### REFERENCES

1. Demkin, N. B. Actual area of contact of solid surfaces / N. B. Demkin. – Moscow : Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. – 112 p.

2. Mesnyankin, S. Y. Solid-solid thermal contact problems: Current understanding / S. Y. Mesnyankin, A. G. Vikulov, D. G. Vikulov // Physics-USpekhi. – 2009. – Vol. 52, No. 9. – P. 891-914.

3. Shlykov, Yu. P. Contact Thermal Resistance / Yu. P. Shlykov, E. A. Ganin, S. N. Tsarevsky. – Moscow : Energiya, 1977. – 328 p.

4. Heat Transfer and Thermal Regime of Spacecraft : [Collection of Articles] : Translated from English / Edited by D. Lucas ; Edited by N. A. Anfimov, Dr. [and with an introduction by] N. A. Anfimov. – Moscow : Mir, 1974. – 543 p.

5. Fletcher, L. S. Contact thermal resistance coefficient of some low thermal conductivity materials used as intercontact gap fillers / L. S. Fletcher, P. A. Smuda, D. A. Gayorog // Rocket engineering and cosmonautics. – 1969. – Vol. 7, No. 7. – P. 107-110.

6. Heat exchange through thin-layers in a contact zone of metall surfaces / V. M. Popov, O. L. Yerin, A. P. Novikov, I. Yu. Kondratenko // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2011. – Vol. 7, No. 6. – P. 37-39.

7. Popov, V. M. Thermistor of a contact layer with fillers between metal surfaces / V. M. Popov, A. P. Novikov, O. L. Yerin, // Modern Problems of Science and Education. – 2012. – No. 1. – P. 185.

8. Contact heat exchange in the joints with low heat-conducting fillers / V. M. Popov, O. L. Yerin, A. A. Tinkov, A. N. Shvyrev / Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2013. – Vol. 9, No. 2. – P. 95-97.

## ОЦЕНКА ПОЖАРНЫХ РИСКОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ

### ASSESSMENT OF FIRE RISKS IN THE PRODUCTION OF POLYMER RESINS

**Мещеряков А.В.**, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры, Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия

**Meshcheryakov A.V.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Head of the Department, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia

**Задиранов А.Н.**, доктор технических наук, профессор, Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия

**Zadiranov A.N.**, DrSc in Technical Sciences, Professor, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia

**Сухих С.В.**, магистрант, Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия

**Sukhoi S.V.**, Master's student, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia

**Птицын В.В.**, магистрант, Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия

**Ptitsyn V.V.**, Master's student, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia

**Аннотация.** Выполнена оценка пожарных рисков при производстве. Определены объемные концентрации паров нефтеполимерной смолы, соответствующие верхнему и нижнему концентрационным пределам воспламенения. Изложена методика экспериментального определения давления насыщения паров нефтеполимерной смолы в зависимости от температуры. Приведены результаты экспериментального исследования равновесного давления от температуры для нефтеполимерной смолы. Предложена функциональная зависимость равновесного давления пара от температуры среды. Определен интервал парциальных давлений и температур, в котором возможно воспламенение технологической жидкости. Произведена оценка различных этапов производства нефтеполимерной смолы с точки зрения пожарной безопасности.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, концентрационные пределы воспламенения, отгонка, давление насыщенных паров, нефтеполимерные смолы.

**Abstract.** An assessment of the fire risks of production was performed. The volumetric concentrations of the vapor of petroleum resin corresponding to the upper and lower concentration limits of ignition are determined. The technique of experimental determination of the vapor saturation pressure of petroleum resin as a function of temperature is described. The results of an experimental study of the equilibrium pressure on temperature for a petroleum polymer resin are presented. A functional dependence of the equilibrium vapor pressure on the temperature of the medium is proposed. The interval of partial pressures and temperatures is determined in which the ignition of

the process fluid is possible. The evaluation of various stages of the production of petroleum resin in terms of fire safety was made.

**Keywords:** fire safety, concentration limits of ignition, distillation, saturated vapor pressure, petroleum polymer resins.

Нефтеполимерные смолы как особый класс низкомолекулярных синтетических смол, обладающих уникальными физико-химическими свойствами, в отечественной и зарубежной практике находят все более широкое применение не только в качестве заменителей пищевых, но и таких продуктов природного происхождения, как канифоль, для сокращения расхода дефицитных инден-кумароновых, феноло-формальдегидных и других смол.

Мировой объем производства нефтеполимерных смол, начиная с 70-х годов постоянно увеличивается и превышает 600 тыс.т/год. Это объясняется, с одной стороны, широкой и доступной сырьевой базой, и низкими затратами на их производство, что обуславливает невысокую стоимость НПС, и, с другой стороны, возможностью использования НПС в самых различных отраслях промышленности (лакокрасочной, целлюлознобумажной, в полиграфии, в производстве резинотехнических изделий и др.).

В зависимости от строения непредельных углеводородов, преобладающих в исходном сырье и прежде всего в жидких продуктах пиролиза, получаемые нефтеполимерные смолы классифицируют следующим образом: ароматические смолы, получаемые сополимеризацией главным образом алкенилароматических углеводородов.

Одной из наиболее важных стадий процесса получения НПС является отгонка высококипящего растворителя, который представляет собой смесь дифенилметана, трифенилметана, дифенила и других веществ с температурой кипения более 250 °С [1] из расплава полимера. При столь высокой температуре происходит деструкция компонентов полимера, его потемнение и ухудшение его качества.

Проблема может быть решена при использовании специализированных аппаратов с малым гидравлическим сопротивлением, высокой площадью поверхности контакта фаз в среде перегретого водяного пара [2]. Задачей является разработка методов расчета параметров процесса и определение теплофизических характеристик применяемых растворителей, что необходимо для оценки пожароопасности, а также моделирования процессов тепло- и массообмена в соответствующем технологическом оборудовании. С этой целью выполнено исследование зависимости давления насыщения паров НПС от температуры.

Пожарные риски нефтеполимерного производства определяются концентрацией углеводородов в паровой фазе, которая определяется температурой жидкости в полимеризаторе.

Воспламенение и распространение пламени в технологической среде возможно в интервале концентраций углеводородов в паровой фазе в интервале от нижнего до верхнего концентрационных пределов углеводородов (НКПР и ВКПР, соответственно). Эти концентрационные пределы могут быть рассчитаны по формуле [3, 4]:

$$\varphi_{n(\phi)} = \frac{100}{a \cdot n + b}, \quad (1)$$

где:  $\varphi_{n(O_2)}$  – НКПР (ВКПР), % (объемн.);  $n$  – стехиометрический коэффициент при кислороде ( $O_2$ ) в реакции горения;  $a, b$  – эмпирические параметры (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры  $a$  и  $b$  для расчета концентрационных пределов распространения пламени

Концентрационные пределы распространения пламени		Параметры	
		a	b
Нижний		8,684	4,679
Верхний	$n \leq 7,5$	1,550	0,560
	$n > 7,5$	0,768	6,554

Объемная концентрация углеводородов в паровой фазе связана с его парциальным давлением следующим соотношением

$$\varphi = \frac{100P_n}{P_0}, \quad (2)$$

где  $P_n$  – парциальное давление углеводородов в паровой фазе;  $P_0$  – общее давление парогазовой среды.

Горение жидкости возможно, если  $\varphi_n < \varphi < \varphi_v$ .

Давление насыщенного пара при известной температуре может быть определено по уравнению Антуана

$$\lg P_n = A - \frac{B}{C + t} \quad (3)$$

или уравнению Вант-Гоффа

$$\frac{d(\ln P_n)}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2} \quad (4)$$

где  $\Delta H$  – теплота испарения жидкости, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Практическое использование соотношения (3) сопряжено с необходимостью предварительного определения эмпирических параметров  $A, B$  и  $C$  на основе экспериментального исследования. Использование соотношения (4) для НПС затруднено отсутствием точной информации о химическом составе НПС и, как следствие, отсутствием данных по теплоте испарения НПС  $\Delta H$ .

Поскольку НПС является многокомпонентной системой, точный химический состав которой неизвестен, то единственным методом получения такой зависимости является экспериментальное исследование [5].

Эксперименты по определению равновесного давления НПС выполнялись в следующей последовательности.

В начальный момент времени (при  $\tau = 0$ ) когда жидкость (НПС) введена в колбу, а испарение незначительно, весь рабочий объем заполнен воздухом. Величина этого объема равна сумме объемов колбы (за вычетом объема жидкости), соединительного трубопровода, свободного объема правого колена манометра и определяется по формуле

$$V_0 = V_{я} + h_0 s - V_{жс}, \quad (5)$$

где  $V_0$  – объем газового пространства в начальный момент времени (при  $\tau = 0$ ),  $\text{м}^3$ ;  $V_{я}$  – рабочий объем ячейки (с учетом объема всех коммуникаций),  $\text{м}^3$ ;  $V_{ж}$  – объем введенной в ячейку жидкости,  $\text{м}^3$ ;  $s$  – площадь сечения манометрической трубки,  $\text{м}^2$ ;  $h_0$  – снижение уровня относительно нулевой отметки в правом столбце манометра, вызванное вводом жидкости в ячейку,  $\text{м}$ .

Давление в системе определяется зависимостью

$$P_0 = P_{ат} + 2\rho_m g h_0, \quad (6)$$

где  $P_0$  – давление в рабочем пространстве в начальный момент времени (при  $\tau = 0$ ),  $\text{Па}$ ;  $P_{ат}$  – атмосферное давление,  $\text{Па}$ ;  $\rho_m$  – плотность манометрической жидкости в манометре,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

В произвольный момент времени после начала испарения ( $\tau > 0$ ) объем газового пространства увеличивался из-за понижения уровня жидкости в правом колене манометра за счет роста давления в системе, т.е.

$$V = V_{я} + h s - V_{жс}, \quad (7)$$

где  $V$  – объем газового пространства в рабочий момент времени после начала испарения ( $\tau > 0$ ),  $\text{м}^3$ ;  $h$  – снижение уровня относительно нулевой отметки в правом колене манометра, вызванное испарением жидкости в системе,  $\text{м}$ .

Рабочее давление в системе в произвольный момент времени соответственно определяется зависимостью

$$P = P_{ат} + 2\rho_m g h. \quad (8)$$

Давление насыщенных паров исследуемого растворителя определялось по формуле

$$P = P_{ат} \cdot \frac{V_0}{V} \cdot \frac{T}{T_0}, \quad (9)$$

где  $T$ ,  $T_0$  – текущая и начальные температуры, соответственно.

На основании экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость равновесного давления паров НПС от температуры

$$p(T) = p_0 \cdot \exp \left[ A \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (10)$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент, определенный методом наименьших квадратов по экспериментальным данным. Установлено, что  $A = 6800$ .

Полученные экспериментальные и расчетные данные обладают удовлетворительной сходимостью. Относительное отклонение не превышает 15 %.

При известных нижнем и верхнем концентрационном пределах распространения пламени для НПС можно оценить температурный интервал, в котором возможно воспламенения НПС.

Для фракции  $C_9$  стехиометрический коэффициент при кислороде в реакции горения  $n = 14$ . Расчеты концентрационных пределов по формуле (1) позволяет получить следующие значения:  $\varphi_H = 0,8 \%$ ,  $\varphi_B = 5,8 \%$  (объемных). Парциальные давления паров НПС, соответствующие этим концентрациям, можно определить по формулам

$$P_{n,n} = P_0 \frac{\varphi_n}{100}, \quad (11)$$

$$P_{n,г} = P_0 \frac{\varphi_g}{100}, \quad (12)$$

где  $P_0 = 10^5$  Па – атмосферное давление.

Для указанных концентраций  $\varphi_n$ ,  $\varphi_b$  эти давления равны  $P_{n,n} = 800$  Па,  $P_{n,г} = 5800$  Па. Температуры НПС, соответствующие этим давлениям могут быть найдены из таблицы 1 или рассчитаны по формуле (10):  $t_n = 112$  °С,  $t_b = 157$  °С.

Таким образом, опасность воспламенения технологической среды наиболее высока на этапе ее нагревания. В режиме отгонки рабочая температура превышает  $t_b$  ( $t = 250$  °С). Возгорание жидкости в этих условиях невозможно, поскольку превышен верхний концентрационный предел.

Полученная зависимость давления насыщенных паров НПС от температуры (10) может быть также использована при определении движущей силы процесса паровой отгонки НПС. Она позволяет оценить температурный интервал, при котором возможно возгорание НПС, создать математическую модель процесса отгонки тяжелого растворителя из расплава нефтеполимерной смолы и разработать методики, позволяющие оптимизировать процесс отгонки, учитывая теплофизические характеристики растворителей и условия процесса в целом, что, позволит обеспечить наименьшую вероятность ее возгорания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уэйлес, С. Фазовые равновесия в химической технологии : В 2 ч. / С. Уэйлес ; Перевод с англ. А. В. Беспалова и др.; Под ред. В. С. Бескова. [Ч.] 2. – Москва : Мир, 1989. – 310 с.
2. Думский, Ю. В. Химия и технология нефтеполимерных смол : монография / Ю. В. Думский, Б. И. Но, Г. М. Бутов. – Москва : Издательство Химия, 1999. – 304 с.
3. Лопанов, А. Н. Физико-химические основы теории горения и взрыва / А. Н. Лопанов. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2012. – 148 с.
4. Портола, В. А. Расчет процессов горения и взрыва: учеб. пособие / В. А. Портола, Н. Ю. Луговцова, Е. С. Торосян. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2012. – 108 с.
5. Удовенко, В. В. Давление пара трехкомпонентных систем / В. В. Удовенко, Л. П. Александрова // Журн. физ. химии. – 1960. – Т. 34, № 6. – С. 1367-1372.

### REFERENCES

1. Wayles, S. Phase Equilibria in Chemical Technology : In 2 Parts / S. Wayles ; Translated from English by A. V. Bespalov et al.; Edited by V. S. Beskov. [Part] 2. – Moscow : Mir, 1989. – 310 p.
2. Dumsky, Yu. V. Chemistry and Technology of Petrochemical Resins: A Monograph / Yu. V. Dumsky, B. I. No, G. M. Butov. – Moscow : Khimiya Publishing House, 1999. – 304 p.
3. Lopanov, A. N. Physical and Chemical Foundations of Combustion and Explosion Theory / A. N. Lopanov. – Belgorod : Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2012. – 148 p.

4. Portola, V. A. Calculation of gorenje and explosion processes: textbook. manual / V. A. Portola, N. Y. Lugovtsova, E. S. Torosyan. – Tomsk : Tomsk Polytechnic University Press, 2012. – 108 p.

5. Udovenko, V. V. Vapor Pressure of Three-Component Systems / V. V. Udovenko, L. P. Aleksandrova // Zhurnal fizicheskoi khimii. – 1960. – Vol. 34, No. 6. – P. 1367-1372.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

## AUTOMATION AND CONTROL OF POWER SYSTEMS

**Муравьев А.В.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия

**Mureviev A.V.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Кочин А.Е.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия

**Kochin A.E.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Сагайдак С.А.**, ассистент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия

**Sagaidak S.A.**, Assistant, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Лубашев А.В.**, студент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия

**Lubashev A.V.**, Student, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Дзигонский Р.К.**, студент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия

**Dzigonsky R.K.**, Student, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Аннотация.** В статье рассмотрены современные направления автоматизации и управления энергетическими системами в условиях роста распределенной генерации, внедрения возобновляемых источников энергии, накопителей, цифровых подстанций и управляемых нагрузок. Показано, что переход от централизованной модели электроэнергетики к распределенной цифровой архитектуре требует многоуровневого мониторинга, оценивания состояния, оптимизации режимов, противоаварийного управления и усиления кибербезопасности. Особое внимание уделено наблюдаемости, частотному и напряженческому регулированию, релейной защите и автоматике, управлению спросом, цифровым двойникам и интеллектуальной аналитике.

**Ключевые слова:** энергетические системы, автоматизация, управление энергосистемой, цифровая подстанция, SCADA, релейная защита и автоматика, накопители энергии, управление спросом, кибербезопасность.

**Abstract.** The article discusses modern trends in the automation and control of energy systems in the context of the growth of distributed generation, the introduction of renewable energy sources, storage devices, digital substations, and controlled loads. It shows that the transition from a centralized model of the electric power industry to a distributed digital architecture requires multi-level monitoring, state estimation, optimization of modes, emergency control, and enhanced cybersecurity. Special attention is given to observability, frequency and voltage regulation, relay protection and automation, demand management, digital twins, and intelligent analytics.

**Keywords:** energy systems, automation, energy system management, digital substation, SCADA, relay protection and automation, energy storage, demand management, cybersecurity.

Энергетические системы обычно проектировались как крупномасштабные иерархические структуры с централизованной генерацией и предсказуемыми потоками силы [1, 2]. Однако, за последнее десятилетие наблюдаются устойчивые изменения: размер распределенной генерации, интеграция переменной генерации на основе ветра и солнца, развития микросетей, увеличение доли силовой электроники, а также электрификация автотранспорта и тепла. Эти факторы повышают динамичность режимов и усложняют задачу обеспечения надежности при одновременном снижении издержек и потерь.

Автоматизация и регулирование энергетических систем в современных условиях становятся ключевыми направлениями становления электроэнергетики, поскольку традиционная модель централизованной генерации и односторонних потоков силы постепенно уступает место более сложной структуре, где увеличивается доля распределенных энергоресурсов, накопителей энергии и управляемых нагрузок [1]. Параллельно возрастают требования к надежности электроснабжения, качеству электроэнергии, экономичности режимов и киберустойчивости инфраструктуры. В эффекте автоматизация перестает быть набором локальных функций на ярусе отдельных объектов и трансформируется в многослойную систему мониторинга, обзора и управления, охватывающую полевой уровень, уровень подстанции, диспетчерские центры и корпоративные силуэты планирования и учета.

Базовой предпосылкой автоматизированного управления считается достаточная наблюдаемость состояния системы. В классическом подходе она поддерживается телеметрией, регистрацией событий и аварийных процессов, а также данными платного и технического учета. Для магистральных сетей существенный прирост информативности выделяют синхронизированные фазорные измерения, позволяющие получать высокочастотные данные о напряжениях и токах с единой временной привязкой и тем самым подвергать анализу низкочастотные колебания, динамику устойчивости и быстро выявлять небезопасные тенденции в режиме [3]. На основе избыточных измерений решается купергань оценивания состояния, когда по неполным и зашумленным данным восстанавливается градиент напряжений узлов сети; точность оценивания состояния открыто определяет качество последующего расчета потокораспределения, выявления перегрузок и принятия руководящих решений.

Функционально автоматизация и управление энергетических систем охватывают немного ключевых контуров. Во-первых, это обеспечение баланса активной силы и поддержание частоты, поскольку любое рассогласование между генерацией и использованием приводит к отклонению частоты, снижению устойчивости и риску каскадных дТП. В энергосистемах применяется многоуровневая схема регулирования: первичная регулировка обеспечивает быструю реакцию генераторов на изменения частоты, вторичный регулятор возвращает частоту к заданному значению и распределяет нагрузку промеж станциями, а третичное регулирование и диспетчерское управление обеспечивают высокоэкономичность и восстановление резервов [1, 4]. Возникновение накопителей энергии и управляемых нагрузок расширяет орудие частотного регулирования: батарейные системы способны обеспечивать

скорый отклик, а спрос может быть временно сокращен или сдвинут во времени при наличии финансовых стимулов.

Во-вторых, важнейшим направлением является управление напряжением и реактивной мощностью, потому что качество электроэнергии и допустимые уровни напряжения требуют интенсивного регулирования реактивных потоков. Классические средства включают регулировку возбуждения синхронных генераторов, использование устройств регулирования под нагрузкой силовых трансформаторов, подключение компенсирующих устройств и статических компенсаторов реактивной мощности [2]. В распределительных сетях, сугубо при высокой доле солнечной генерации, все более значимым делается оптимизационное управление Volt/Var, позволяющее одновременно удерживать наведенное напряжение в нормативных пределах и снижать потери. Существенным сдвигом считается использование инверторных ресурсов как источника реактивной мощности и как энергетических участников поддержания напряжения, что требует согласованной настройки локальных контроллеров и диспетчерских алгоритмов.

Третьим крупным блоком выступают системы релейной обороны и противоаварийной автоматики, обеспечивающие селективное отключение поврежденных деталей, локализацию аварий и сохранение устойчивости энергосистемы [5]. Сюда относятся механическое повторное включение, автоматика частотной разгрузки, автоматика лимитирования перетоков, схемы предотвращения развития каскадных аварий и алгоритмы управляемого разделения системы на устойчивые части. Современная направленность заключается в переходе к более адаптивным противоаварийным стратегиям, базирующимся на расширенном мониторинге и данных синхрофазоров, когда решения воспринимаются не только по фиксированным уставкам, но и с учетом текущего режима и легкодоступных резервов.

Еще одним важным блоком является оптимизация режимов и регулирование ограничениями. Задачи оптимального потокораспределения позволяют минимизировать издержки или стоимость генерации при соблюдении ограничений по напряжениям, токам линий, силы генераторов и резервам [2]. В практической эксплуатации требуется учитывать неясность исходных данных, нелинейность моделей, дискретность управляющих воздействий и притязаний к вычислительной скорости, поэтому применяются приближенные методы, расщепление по уровням сети и итеративные процедуры, согласующие решения посреде магистральным и распределительным контуром.

Существенное значение приобретают футурология нагрузки и генерации возобновляемых источников, а также управление спросом и эластичностью. Переменная генерация усиливает неопределенность режимов, повышает спрос в резервах и усложняет планирование. Для прогнозирования используются статистические способы, модели машинного обучения и гибридные подходы, учитывающие атмосферные, сезонные и поведенческие факторы. Потребитель при этом превращается из пассивного составляющего системы в источник управляемого ресурса: управление спросом реализуется посредством тарифных механизмов, программ стимулирования и участия агрегаторов, объединяющих ворох потребителей для предоставления системных услуг, включая снижение пиков, регулировку частоты и поддержку напряжения.

Важным вектором развития автоматизации становится цифровизация инфраструктуры, прежде всего через концепции цифровых подстанций, цифровых двойников и интрузии интеллектуальной аналитики. Цифровая подстанция предполагает перевод сигналов и взаимодействие приспособлений на цифровые протоколы, унификацию обмена данными и рост размера доступной диагностической информации [6]. Цифровые двойники формируют динамические модели оборудования и сетевых объектов, которые обновляются эксплуатационными данными и используются для анализа сценариев, ревизии алгоритмов управления, обучения персонала и предиктивного обслуживания. Методы синтетического интеллекта применяются для обнаружения аномалий в телеметрии, диагностики недостатков по данным датчиков, прогнозирования нагрузки и генерации, а также для поддержки диспетчерских решений в условиях неопределенности.

Одновременно объекты расширения цифровых функций повышает риски кибервоздействий, поэтому кибербезопасность делается не внешним дополнением, а неотъемлемой частью надежности управления [3]. Для систем автоматизации принципиальны сегментация сетей, управление доступом, мониторинг событий безопасности, резервирование каналов взаимосвязи, защищенные обновления и регламенты реагирования. Нарушение управления иногда без физического повреждения оборудования способно привести к ограничению электроснабжения и аварийному становлению режима, поэтому киберустойчивость следует рассматривать как компонент системной стабильности энергосистемы.

Таким образом, автоматизация и управление энергетических систем эволюционируют от локальных задач контролирования и защиты к комплексным интеллектуальным платформам, объединяющим мониторинг, приценивание состояния, оптимизацию и противоаварийное управление с интеграцией распределенных энергоресурсов, накопителей и контролируемого спроса [1, 6]. Дальнейшее развитие будет определяться ростом наблюдаемости распределительных сетей, расширением функций инверторных источников, формированием рынков эластичности, масштабированием цифровых двойников и ужесточением требований к кибербезопасности. Комплексный расклад, соединяющий инфраструктуру измерений и связи, современные алгоритмы оптимизации и специалистов, а также организационные регламенты эксплуатации и безопасности, позволяет обеспечить равновесие между надежностью, экономичностью и технологической адаптивностью энергетических систем [2].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматика энергосистем: учеб. руководство / Ю. С. Боровиков, А. С. Гусев, М. В. Андреев, А. О. Сулайманов. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2015. – 196 с.
2. Дроздов, А. Д. Автоматизация энергетических систем / А. Д. Дроздов. – Москва : Энергия, 1977. – 440 с.
3. Пушков, В. М. SCADA-система «ТЕКОН»: учеб. пособие / В. М. Пушков, Е. К. Торопова; ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2019. – 132 с.

4. Шукин, О. С. Основы механического управления энергосистем: учеб. пособие / О. С. Шукин. – Нижневартовск : Издательство Нижневартовского гуманитарного университета, 2012. – 107 с.

5. Киреева, Э. А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: учебник / Э. А. Киреева, С. А. Цырук. – Москва : Издательский центр «Академия», 2013. – 288 с.

6. Чижма, С. Н. Цифровые подстанции: учеб. пособие / С. Н. Чижма, А. И. Захаров. – Калининград : Издательство БФУ им. И. Канта, 2022. – 80 с.

#### REFERENCES

1. Automation of Power Systems: Textbook / Yu. S. Borovikov, A. S. Gusev, M. V. Andreev, A. O. Sulaimanov. – Tomsk : Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2015. – 196 p.

2. Drozdov, A. D. Automation of energy systems / A. D. Drozdov. – Moscow : Energiya, 1977. – 440 p.

3. Pushkov, V. M. SCADA-system «ТЕКОН»: Textbook / V. M. Pushkov, E. K. Toropova; FGBOU VO «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin». – Ivanovo, 2019. – 132 p.

4. Shchukin, O. S. Fundamentals of Mechanical Control of Power Systems: Textbook / O. S. Shchukin. – Nizhnevartovsk : Publishing House of Nizhnevartovsk Humanitarian University, 2012. – 107 p.

5. Kireeva, E. A. Relay protection and automation of electric power systems: Textbook / E. A. Kireeva, S. A. Tsyruk. – Moscow : Publishing Center «Academy», 2013. – 288 p.

6. Chizhma, S. N. Digital substations: Textbook / S. N. Chizhma, A. I. Zakharov. – Kaliningrad : I. Kant Baltic Federal University Publishing House, 2022. – 80 p.

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ  
В КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ  
HEAT TRANSFER PROCESS INTENCIFICATION IN SHALL-AND-TUBE HEAT  
EXCHANGERS**

**Панченко С.Л.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Panchenko S.L.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Хрипченко М.С.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Khripchenko M.S.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Новиков А.П.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Novikov A.P.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Толстов С.А.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Tolstov S.A.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Толстова А.С.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Tolstova A.S.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье обоснована необходимость интенсификации процесса передачи теплоты между горячим и холодным теплоносителями в кожухотрубчатых теплообменных аппаратах. Данные аппараты используются во многих отраслях промышленности. При постоянном увеличении производительности необходимо интенсифицировать процесс теплопередачи, что возможно увеличением или площади поверхности теплообмена, или коэффициента теплопередачи. Поскольку теплообменные аппараты изготавливаются из дорогостоящих материалов, наиболее рациональным является увеличение коэффициента теплопередачи. Рассмотрены способы интенсификации процесса теплопередачи способами изменения положения теплообменных труб и изготовлением в них поперечной кольцевой накатки.

**Ключевые слова:** кожухотрубчатый теплообменный аппарат, интенсификация процесса теплопередачи, теплообменные трубы, поперечная кольцевая накатка.

**Abstract.** This article substantiates the need to intensify the heat transfer process between hot and cold coolants in shell-and-tube heat exchangers. These units are used in many industries. With a constant increase in productivity, it is necessary to intensify the heat transfer process, which can be achieved by increasing either the heat transfer surface area or the heat transfer coefficient. The methods of intensifying the heat transfer process by changing the position of the heat exchanger tubes and making transverse annular knurling in them are considered.

**Keywords:** shell-and-tube heat exchanger, heat transfer process intensification, heat exchangers tubes, transverse annular knurling.

Теплообменные аппараты используются во многих отраслях народного хозяйства: промышленности, добыче полезных ископаемых, коммунально бытовых услугах, на транспорте и т.д. Особенно велика доля их использования в нефте- и газодобывающей, нефтехимической, химической и пищевой отраслях, а также в некоторых других производствах. Например, на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности доля теплообменного оборудования достигает 40 %, нефтехимической – 30 %, пищевой – 30 %. Соответственно, доля амортизационных расходов именно на теплообменные аппараты в данных производствах значительна [1].

Как известно, объемы потребления товаров, производимых вышеперечисленными предприятиями, а значит и их производства, растут из года в год. Это означает постоянный рост производительности технологических линий, а соответственно и входящих в их состав и теплообменных аппаратов. Для обеспечения охлаждения или нагрева необходимого в производстве теплоносителя на одно и то же количество единиц температуры при росте производительности необходимо увеличивать площадь поверхности теплообмена с целью интенсификации процесса. Таким образом, налицо большие затраты материалов на изготовление теплообменного аппарата, что требует огромных капитальных вложений, а также амортизационных затрат после ввода теплообменника в эксплуатацию. Учитывая еще и тот факт, что основным материалом для изготовления теплообменных аппаратов нефте- и газодобывающей и нефтехимической промышленности является легированная сталь 09Г2С, а аппаратов химической и пищевой – еще более дорогостоящая высоколегированная хромоникелевая коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т (обычная углеродистая сталь быстро придет в негодность из-за агрессивных веществ), проблема создания более компактных и менее дорогостоящих аппаратов с целью экономии металла и энергии очевидна.

Как известно, площадь поверхности теплообмена является одним из основных показателей процесса теплопередачи между теплоносителями в аппарате, и ее увеличение интенсифицирует процесс, но, как было сказано выше, это приводит к большим экономическим затратам. Другим способом роста интенсивности теплообменного процесса при увеличении производительности является увеличение коэффициента теплопередачи, что можно достичь при одной и той же, или даже меньшей площади поверхности теплообмена, обеспечив таким образом экономию. Рассмотрим данный способ более подробно.

Как известно, даже при турбулентном движении теплоносителей около стенок труб, по которым они движутся, существует ламинарный подслой и тепловой пограничный слой, где движение жидкости ламинарное (слоистое), и теплоотдача происходит в основном за счет теплопроводности. Коэффициент теплопроводности теплоносителей (жидкостей или газов) имеет небольшие значения, что снижает интенсивность теплообмена. Поэтому интенсификацию процесса теплообмена в трубчатых теплообменных аппаратах, не усложняя их конструкции, можно осуществить способами, направленными на ускорение вихреобразования (турбулизации) именно в тепловом пограничном слое за счет его разрушения и таким образом обеспечения теплоотдачи со стенкой трубы конвекцией, а не теплопроводностью. В кожухотрубчатых теплообменных аппаратах, являющихся самыми распространенными, данными способами будут являться изменение расположения труб в пучке (при этом интенсифицируется процесс теплоотдачи в межтрубном пространстве) или применением накатки на трубах для интенсификации теплообмена внутри них. Рассмотрим данные способы применительно к кожухотрубчатому теплообменному аппарату.

На рисунке 1 приведена схема конструкции кожухотрубчатого теплообменного аппарата с несколькими ходами теплоносителей в трубах и межтрубном пространстве.

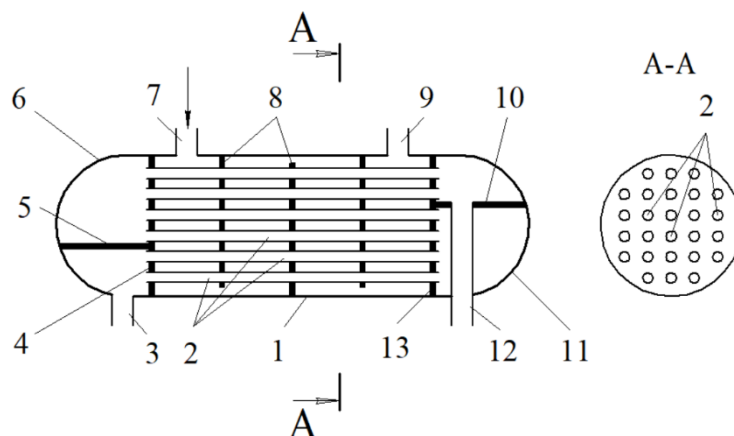


Рисунок 1 – Схема конструкции кожухотрубчатого теплообменного аппарата:

- 1 – обечайка; 2 – теплообменные трубки; 3, 7, 9, 12 – патрубки; 4, 13 – трубные решетки (доски); 5, 10 – продольные перегородки; 6, 11 – крышки;  
8 – поперечные перегородки

Корпусом аппарата является обечайка 1, к которой с двух сторон присоединены крышки 6 и 11. В крышках установлены трубные решетки (доски) 4 и 13, имеющие форму диска с отверстиями. В отверстиях трубных решеток жестко закреплены (в основном способом завальцовки) многочисленные теплообменные трубки 2, стенки которых являются основной теплопередающей поверхностью. Пучки труб при этом, как видно на разрезе А-А, расположены без смещения друг относительно друга. Теплоноситель с меньшей вязкостью проходит внутри труб, более вязкий подается в межтрубное пространство. Проходящий внутри труб теплоноситель подается в аппарат через патрубок 3 и проходит через часть труб, поскольку в крышке 6 установлена перегородка 5. Пойдя часть пучка труб и дойдя до другого конца аппарата, поток данного теплоносителя разворачивается и попадает также в часть труб,

расположенных выше, поскольку аналогично в крышке 11 установлена перегородка 10. Пройдя по этой части труб, теплоноситель разворачивается и проходит оставшуюся часть труб, после которой удаляется из аппарата через патрубок 12. Таким образом, получается трехходовая схема движения теплоносителя в трубах, что делается с целью увеличения скорости и числа Рейнольдса; таким образом, данное конструктивное решение принято с той же целью – интенсификация процесса теплообмена. Теплоноситель, движущийся в межтрубном пространстве, подается в аппарат через патрубок 7 и проходит межтрубное пространство также за несколько ходов благодаря нескольким поперечным перегородкам 8, установленным параллельно трубным решеткам, выходит из аппарата теплоноситель через патрубок 9.

Как говорилось выше, одним из способов интенсификации процесса теплообмена в кожухотрубчатом теплообменном аппарате является изменение расположения труб в пучке. Трубы, расположенные без смещения друг относительно друга, как показано на разрезе А-А (см. рисунок 1 и рисунок 2а), образуют коридорный пучок; а если один ряд труб будет смещен относительно другого (и так повторяется через ряд), как показано на рисунке 2б, это называется шахматным расположением труб в пучке.

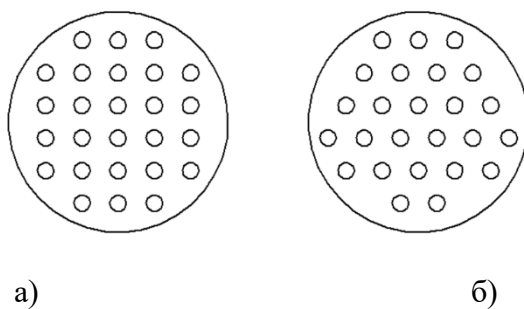


Рисунок 2 – Схема коридорного (а) и шахматного (б) расположения теплообменных труб

При изменении расположения труб с коридорного на шахматное порядок изменяется характер течения теплоносителя в межтрубном пространстве. За счет турбулизации потока и более интенсивного образования вихрей увеличивается и главная величина, характеризующая теплообмен – коэффициент теплоотдачи (в данном случае рассматривается теплоотдача между теплоносителем, циркулирующим в межтрубном пространстве и наружными стенками теплообменных трубок).

Как известно, из-за зависимости коэффициента теплоотдачи от многих факторов, учесть которые в большинстве случаев невозможно, сам коэффициент теплоотдачи не исследуют, а заменяют его безразмерным критерием Нуссельта, которому коэффициент теплоотдачи пропорционален. При значениях чисел Рейнольдса движения теплоносителя в межтрубном пространстве  $Re > 10^3$  для критерия Нуссельта справедливы следующие уравнения [2]:

– при коридорном расположении труб:

$$Nu_{ш} = 0,22 Re_{ж}^{0,65} Pr_{ж}^{0,36} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{с}} \right)^{0,25} ; \quad (1)$$

– при шахматном расположении труб:

$$Nu_k = 0,40 Re_{ж}^{0,6} Pr_{ж}^{0,36} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где  $Pr$ ,  $Pr_{ст}$  – критерий Прандтля теплоносителя при его средней температуре и средней температуре стенки.

Таким образом, соотношение между критериями Нуссельта:

$$\frac{Nu_{ш}}{Nu_k} = 1,18, \quad (3)$$

т.е. интенсивность теплообмена при шахматном расположении теплообменных трубок возрастает по сравнению с коридорным расположением примерно чуть менее чем на 20 %.

Другим способом интенсификации теплообмена в кожухотрубчатом теплообменном аппарате является изменение рельефа самих трубок, направленное на увеличение коэффициента теплоотдачи между стенкой и теплоносителем, циркулирующим внутри них. Без введения дополнительных элементов в теплообменник, а значит, без усложнения его конструкции, данное увеличение может быть достигнуто за счет создания дискретно-шероховатой поверхности теплообмена [3, 4]. Предполагает изменение рельефа трубы, распространенным способом является изготовление кольцевой накатки, наиболее простой из которых является поперечная кольцевая. Технологическая операция по изготовлению поперечной кольцевой накатки производится с помощью накатных роликов, причем не требует специального оборудования, достаточного обычного токарного станка, поэтому способ является относительно простым. На рисунке 3 приведена схема поперечной кольцевой накатки и разрез гладкой трубы и трубы, оснащенной поперечной кольцевой накаткой, выполненный в программе КОМПАС-3D.

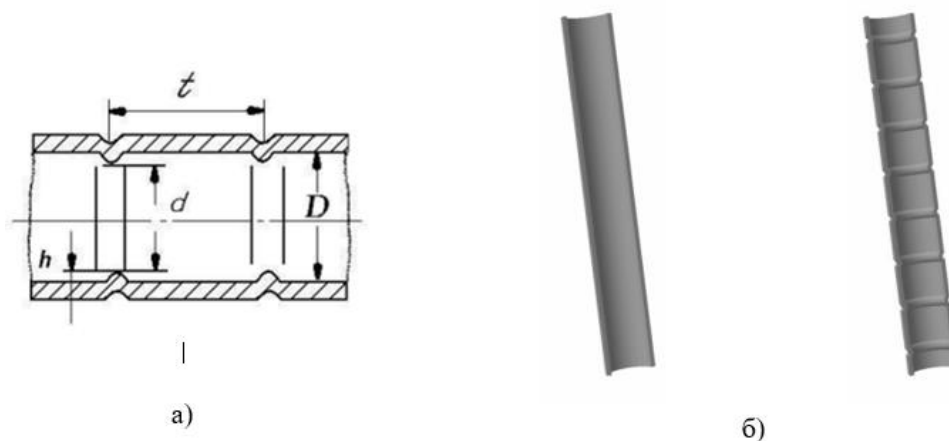


Рисунок 3 – Схема поперечной кольцевой накатки (а) и 3D-модель гладкой трубы и трубы с накаткой (б)

Как видно из рисунка 3а при поперечной кольцевой накатке на наружной части трубе образуются углубления, а внутри трубы – выступы в виде колец высотой  $h$ , равной разности внутреннего диаметра трубы  $D$  и ее внутреннего диаметра  $d$  с учетом его уменьшения в месте кольцевого выступа, шаг между выступами равен  $t$ . Именно высота получившегося кольцевого

бугорка  $h$  влияет на процесс теплообмена между стенкой и теплоносителем, движущимся внутри трубы, она разрушает ламинарный подслой и тепловой пограничный слой, таким образом турбулизуется поток и снижается доля теплопроводности в конвективном теплообмене. Размер  $h$  нужно подбирать таким, чтобы разрушить пограничный слой, большее его значение приводит к увеличению гидравлического сопротивления. Аналогично, значительный размер шага  $t$  приведет к тому, что разрушение пограничного слоя будет происходить около выступов, а дальше он опять будет появляться, что снизит интенсивность процесса конвективного теплообмена, а малый размер  $t$ , хотя и будет разрушать пограничный слой по всей длине трубы, приведет к увеличению гидравлического сопротивления теплоносителя. Таким образом, геометрические характеристики кольцевой накатки  $h$  и  $t$  напрямую связаны с тем, во сколько раз увеличится коэффициент теплоотдачи и не появится ли при этом дополнительное сопротивление движению теплоносителя.

Установлено [5], что применительно к жидким и газообразным теплоносителям в трубе с внутренним диаметром  $D$  при  $Re > 10^4$ , оснащенной поперечной кольцевой накаткой с геометрическими характеристиками  $d$ ,  $h$  и  $t$  между обезразмеренными коэффициентами теплоотдачи существует примерная зависимость:

при  $\frac{d}{D} = 0,9...0,98$ ,  $\frac{t}{D} = 1...10$

$$Nu = Nu_0 \left( 1 + \frac{\ln Re - 4,6}{7,45} \right) \left( \frac{1,14 - 0,28 \sqrt{1 - \frac{d}{D}}}{1,14} \right) \exp \left[ \frac{9 \left( 1 - \frac{d}{D} \right)}{\left( \frac{t}{D} \right)^{0,58}} \right]; \quad (4)$$

при  $\frac{d}{D} = 0,88...0,98$ ,  $\frac{t}{D} = 0,25...0,8$

$$Nu = Nu_0 \left( 1 + \frac{\ln Re - 4,6}{35} \right) \left[ 3 - 2 \exp \left[ \frac{-18,2 \left( 1 - \frac{d}{D} \right)^{1,13}}{\left( \frac{t}{D} \right)^{0,326}} \right] \right], \quad (5)$$

где  $Nu_0$ ,  $Nu$  – критерий Нуссельта при конвективном теплообмене теплоносителя и стенки трубы в гладкой трубе и трубе с поперечной кольцевой накаткой.

Изменение расположения труб с коридорного на шахматный порядок обеспечивает рост коэффициента теплоотдачи при теплообмене в межтрубном пространстве, а изготовление кольцевой накатки в самих трубах – рост коэффициента теплоотдачи при теплообмене внутри труб. Если объединить данные способы, то получится увеличение обоих коэффициентов теплоотдачи, а значит и коэффициента теплопередачи, являющегося основной характеристикой процесса передачи теплоты от горячего теплоносителя к холодному, что позволит интенсифицировать процесс и лучше охладить холодный теплоноситель, а при одной и той же разности температур – уменьшить площадь поверхности теплообмена, а это значит уменьшение массы, материалоемкости и стоимости всего кожухотрубчатого аппарата. Причем применение данных способов не предполагает введение дополнительных элементов со сложной технологией изготовления (например различных типов завихрителей в трубах).

Таким образом, вышеперечисленные способы позволяют интенсифицировать процесс теплопередачи между горячим и холодным теплоносителями без усложнения конструкции и технологии изготовления теплообменного аппарата.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бектурсынов, А. М. Интенсификация теплообмена в межтрубном пространстве кожухотрубчатых теплообменников / А. М. Бектурсынов, С. Б. Бердимбетов, Н. К. Юсупова // *Universum: технические науки: электрон. научн. журн.* 2022. – 6 (99) URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13880> (дата обращения: 25.02.2026).

2. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Москва : Энергия, 1977. – 344 с.

3. Лаптев, А. Г. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов / А. Г. Лаптев, Н. А. Николаев, М. М. Башаров. – Москва : «Теплотехник», 2011. – 335 с.

4. Панченко, С. Л. Интенсификация процесса теплоотдачи в трубах авиационного топливомасляного теплообменника / С. Л. Панченко, С. А. Толстов // *Физические основы наукоемких технологий в современном мире: материалы Всероссийской научно-методической конференции с международным участием, посвящённой 80-летию со дня рождения профессора В. В. Постникова, приуроченной к 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 15 апреля 2025 г. / отв. ред. Н.Ю. Евсикова, С.В. Внукова; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ».* – Воронеж, 2025. – С. 127-135.

5. Интенсификация теплообмена: учеб. пособие / В. Н. Белозерцев, В. В. Бирюк, А. И. Довгялло [и др.]. – Самара : Издательство Самарского университета, 2018. – 208 с.

### REFERENCES

1. Betkursynov, A. M. Heat exchange intensification in intertube space of shell-and-tube heat exchangers / A. M. Betkursynov, S. B. Berdimbetov, N. K. Yusupova // *Universum: technical sciences: el. science. jor.* 2022. – 6 (99) URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13880> (date of access: 25.02.2026).

2. Mikheev, M. A. Basics of heat transfer / M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva. – Moscow : Energy, 1977. – 344 p.

3. Laptev, A. G. Methods of intensification and modeling of heat mass transfer processes / A. G. Laptev, N. A. Nikolaev, M. M. Basharov. – Moscow : «Heating engineer», 2011. – 335 p.

4. Panchenko, S. L. Heat transfer process intensification in aircraft oil-fuel heat exchange tubes / S. L. Panchenko, S. A. Tolstov // *Physical basis of science-intensive technologies in the modern world Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference with International Participation, dedicated to the 80th anniversary of the birth of Professor V.V. Postnikov, timed to the 95th anniversary of VSUFT named after G.F. Morozov Voronezh, April 15, 2025 / resp. ed. N.Yu. Evsikova, S.V. Vnukova; Ministry of science and high education of Russian Federation, FSBEI HE «VSUFT».* – Voronezh, 2025. – P. 127-135.

5. Heat transfer intensification: training manual / V. N. Belozertsev, V. V. Biryuk, A. I. Dovgyallo [et al.]. – Samara : Samara University Publ., 2018. – 208 p.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ДЕРЕВОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА**

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF FUEL AND ENERGY RESOURCES USE AT WOOD PROCESSING ENTERPRISES**

**Попова А.Р.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Popova A.R.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Акиншина К.С.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Akinshina K.S.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Внукова С.В.**, кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Vnukova S.V.**, PhD in Physics and Mathematics, Acting Head of the Electrical Engineering, Thermal Engineering and Hydraulics Department, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Баранов П.А.**, преподаватель СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Baranov P.A.**, College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** Деревоперерабатывающая промышленность относится к числу энергоемких секторов экономики, где затраты на топливно-энергетические ресурсы составляют значительную долю себестоимости готовой продукции. При этом специфика отрасли создает предпосылки для формирования замкнутых энергетических циклов на основе использования собственных отходов переработки древесины. В статье рассматриваются современные подходы к повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на предприятиях деревоперерабатывающего комплекса. Проведен анализ основных направлений энергосбережения, включая оптимизацию режимов работы сушильного оборудования, утилизацию вторичных энергетических ресурсов, внедрение автономных источников теплоснабжения на древесных отходах.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, топливно-энергетические ресурсы, деревопереработка, сушка древесины, древесные отходы, автономное теплоснабжение, вторичные энергоресурсы.

**Abstract.** The wood processing industry is one of the energy-intensive sectors of the economy, where the cost of fuel and energy resources constitutes a significant share of the finished product cost. At the same time, the specific nature of the industry creates prerequisites for the formation of closed energy cycles based on the use of own wood processing waste. The article discusses modern approaches to improving the efficiency of fuel and energy resources use at wood processing enterprises. The analysis of the main areas of energy saving is carried out, including optimization of drying equipment operating modes, utilization of secondary energy resources, introduction of autonomous heat supply systems based on wood waste.

**Keywords:** energy efficiency, fuel and energy resources, wood processing, wood drying, wood waste, autonomous heat supply, secondary energy resources.

Проблема повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) приобретает особую актуальность в условиях современной экономики. Для деревоперерабатывающей промышленности характерна высокая энергоемкость производства: затраты на тепло- и электроэнергию могут достигать 20-30 % в структуре себестоимости продукции [1]. При этом значительная часть потребляемой энергии приходится на технологические процессы, связанные с сушкой пиломатериалов, которая является одним из наиболее энергоемких этапов деревообработки.

Особенностью деревоперерабатывающих производств является наличие значительного объема древесных отходов (опилки, стружка, кора, горбыль), которые могут рассматриваться как возобновляемый источник энергии. По различным оценкам, количество образующихся отходов составляет от 20 до 40 % от объема перерабатываемой древесины. Рациональное использование этого ресурса позволяет не только снизить затраты на энергоносители, но и решить экологические проблемы, связанные с утилизацией отходов [2].

Целью настоящей работы является анализ и систематизация основных направлений повышения эффективности использования ТЭР на предприятиях деревоперерабатывающего комплекса, а также оценка перспектив внедрения энергосберегающих технологий в условиях типового производства.

Деревообрабатывающее производство включает ряд технологических операций, каждая из которых характеризуется определенным уровнем энергопотребления. К числу наиболее энергоемких процессов относятся: сушка пиломатериалов (до 50-70% общих энергозатрат); механическая обработка древесины (пиление, фрезерование, шлифование); создание микроклимата в производственных помещениях (отопление, вентиляция); транспортные операции и вспомогательные нужды.

Структура энергопотребления во многом определяется типом производства, номенклатурой выпускаемой продукции, применяемым оборудованием и климатическими условиями региона. Для предприятий, расположенных в средней полосе России, характерно увеличение доли тепловой энергии в осенне-зимний период за счет отопительной нагрузки.

Анализ показывает, что значительные резервы энергосбережения связаны с совершенствованием процессов сушки древесины. Традиционные конвективные сушильные камеры характеризуются низким коэффициентом полезного использования теплоты (КПИ), значительная часть которой теряется с отработанным теплоносителем [3].

Одним из наиболее доступных и быстрокупаемых направлений энергосбережения является оптимизация режимов работы существующего сушильного оборудования. Исследования показывают, что применение двухступенчатой стратегии сушки с изменением скорости теплоносителя позволяет добиться существенной экономии энергии. Так, снижение скорости воздуха с 3 м/с до 1 м/с при достижении влажности древесины ниже 40 % обеспечивает сокращение энергопотребления до 50 % за счет уменьшения затрат на привод вентиляторов. Кроме того, важным резервом является автоматизация процессов управления сушкой с использованием современных систем контроля влажности и температуры. Применение нейросетевых моделей для прогнозирования изменения влажности материалов позволяет более точно выдерживать заданные режимы и исключать нерациональные перерасходы энергии.

Значительный потенциал энергосбережения связан с утилизацией теплоты отработанного теплоносителя (паровоздушной смеси), удаляемого из сушильных камер. Температура удаляемого агента сушки составляет 35-45 °С, при этом его относительная влажность близка к 100 % [4]. Утилизация теплоты конденсации водяных паров позволяет подогревать приточный воздух или воду для системы отопления. Применение теплоутилизаторов с промежуточным теплоносителем или рекуперативных теплообменников обеспечивает экономию тепловой энергии на 15-25 %. При этом срок окупаемости такого оборудования не превышает 2-3 лет.

Другим направлением является использование теплоты дымовых газов, образующихся при сжигании топлива в котельных установках. Установка экономайзеров за котлами позволяет снизить температуру уходящих газов и дополнительно подогревать питательную воду или воздух, поступающий в топку [4].

Наиболее перспективным направлением повышения энергоэффективности деревоперерабатывающих предприятий является создание автономных источников теплоснабжения, работающих на древесных отходах. Данный подход позволяет решить одновременно несколько задач: снижение затрат на приобретение традиционных энергоносителей (природный газ, мазут, уголь); исключение расходов, связанных с вывозом и утилизацией отходов; уменьшение зависимости от централизованных источников теплоснабжения; повышение экологичности производства за счет использования возобновляемого топлива [2].

Практический опыт внедрения автономных котельных на древесных отходах подтверждает высокую эффективность таких решений. В качестве примера можно привести реализацию проекта автономной котельной тепловой мощностью 1,6 МВт на базе двух котлов по 0,8 МВт, работающих на древесных отходах [2]. Котельная обеспечивает теплом производственный цех, включая системы отопления, сушильные камеры и горячее водоснабжение. При этом организация механизированного склада топлива под существующими бункерами аспирации позволила минимизировать капитальные затраты и обеспечить автоматическую работу системы топливоподачи.

Важным элементом современных котельных на древесных отходах является применение автоматизированных систем управления процессом горения. Использование сигнализаторов уровня топлива в топке, работающих по принципу отражения ультразвуковых

волн, позволяет точно дозировать подачу топлива и поддерживать оптимальный режим горения, что повышает КПД котла и снижает выбросы вредных веществ.

Перспективным направлением углубленной переработки древесных отходов является их термохимическая конверсия с получением высококачественного топлива. Торрефикация – процесс термической обработки биомассы при температурах 220-300 °С в бескислородной среде позволяет повысить энергетическую плотность топлива, улучшить его гидрофобные свойства и размолоспособность [5]. Исследования показывают, что торрефикация древесных отходов позволяет увеличить теплотворную способность и снизить равновесную влажность, что делает такое топливо пригодным для длительного хранения и транспортировки [6]. Кроме того, в процессе торрефикации выделяются летучие органические соединения, которые могут быть сконденсированы и использованы как сырье для химической промышленности [5, 7].

Другим вариантом является газификация древесной биомассы с получением генераторного газа (синтез-газа), который может сжигаться в топках котлов или использоваться в газопоршневых установках для выработки электроэнергии. Современные разработки в области интегрированных газогенераторных систем с циклонными горелками демонстрируют высокую эффективность такого подхода. Применение газогенераторных установок для производства тепла в процессах сушки древесины позволяет сократить расход топлива на 60-70 % и снизить выбросы CO<sub>2</sub> по сравнению с традиционным прямым сжиганием [3].

Экономическая эффективность внедрения энергосберегающих мероприятий на деревоперерабатывающих предприятиях может быть оценена на основе показателей чистого дисконтированного дохода (ЧДД), срока окупаемости и индекса доходности инвестиций.

Для типового деревообрабатывающего предприятия с объемом переработки 20000 м<sup>3</sup> древесины в год характерно образование около 6000 м<sup>3</sup> древесных отходов. Теплотворная способность отходов при влажности 40 % составляет примерно 8-9 МДж/кг, что эквивалентно сжиганию 1500-2000 тонн условного топлива в год.

Внедрение автономной котельной на древесных отходах требует капитальных затрат в размере 8-12 млн. рублей (в ценах 2025 года) в зависимости от мощности и степени автоматизации. При существующих тарифах на природный газ и электроэнергию, а также с учетом затрат на вывоз и утилизацию отходов, срок окупаемости такого проекта составляет 3-5 лет.

Дополнительный экономический эффект может быть получен за счет оптимизации режимов сушки и утилизации вторичных энергоресурсов. Затраты на модернизацию систем автоматизации сушильных камер и установку теплоутилизаторов окупаются за 2-3 года и обеспечивают снижение энергопотребления на 15-20 %.

Следует также учитывать, что реализация энергосберегающих мероприятий позволяет предприятию снизить углеродный след производимой продукции, что повышает ее конкурентоспособность на экспортных рынках, предъявляющих все более жесткие требования к экологичности продукции.

Таким образом, повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на предприятиях деревоперерабатывающего комплекса является многоаспектной задачей, решение которой требует комплексного подхода. Основными направлениями энергосбережения выступают:

1. Оптимизация режимов работы сушильного оборудования, включая применение двухступенчатых режимов с регулированием скорости теплоносителя и использование автоматизированных систем управления на основе нейросетевых моделей прогнозирования.

2. Утилизация вторичных энергетических ресурсов (теплоты отработанного теплоносителя, дымовых газов) с применением теплообменного оборудования.

3. Использование древесных отходов в качестве возобновляемого топлива для автономных источников теплоснабжения.

4. Применение технологий термохимической конверсии биомассы (торрефикация, газификация) для получения высококачественного топлива.

Реализация указанных мероприятий позволит не только снизить затраты на энергоносители и повысить конкурентоспособность продукции, но и решить экологические проблемы, связанные с утилизацией отходов, а также снизить зависимость предприятия от внешних источников энергоснабжения. Экономическая эффективность инвестиций в энергосберегающие технологии на деревоперерабатывающих предприятиях подтверждается приемлемыми сроками окупаемости и положительными значениями показателей доходности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин, Р. Р. Энергосбережение: современный подход к повышению эффективности деревообрабатывающих предприятий России / Р. Р. Сафин, А. В. Беляева // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2005. – № 3. – С. 11-13.

2. Ахтямов, Ф. Автономный путь к обеспечению предприятия дешевой тепловой энергией / Ф. Ахтямов // *ЛесПромИнформ*. – 2008. – № 2(51). – URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=596> (дата обращения: 27.02.2026).

3. Performance and emission analysis of an integrated cross-draft biomass gasifier and cyclonic burner with an air-mixing chamber for hot air generation in wood drying for international export / N. Unsomsri, S. Wiriyasart, S. Kaewluan // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2025. – Vol. 68. – Article 104198. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904925009898> (дата обращения: 27.02.2026).

4. Франтов, Н. А. Повышение энергоэффективности конвективных камер для сушки древесины : выпускная квалификационная работа / Н. А. Франтов ; Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2024. – 120 с.

5. Torrefaction of lignocellulosic residues / Fraunhofer Institute for Interfacial Engineering and Biotechnology IGB. – 2025. – URL: <https://www.igb.fraunhofer.de/en/research/thermal-separation-processes/torrefaction.html> (дата обращения: 27.02.2026).

6. Torrefaction of wood construction waste and eucalyptus blends for biofuel with enhanced energy density and low ash content / T. Barbosa, B. S. Chaves, L. G. O. Galvão [et al.] // *31<sup>st</sup> European Biomass Conference and Exhibition (EUBCE 2023) : proceedings*. – Bologna, Italy, (5-8 June) 2023. – P. 157-163.

7. Физико-химические процессы при торрефикации лигноцеллюлозного сырья / Р. М. Хазиахмедова, А. А. Макаров, Г. М. Бикбулатова, В. Н. Башкиров ; науч. рук. А. Н. Грачев // *Современные проблемы природопользования и природообустройства : сборник*

тезисов докладов Международной научно-практической конференции молодых ученых, посвящённой 50-летию кафедры природообустройства, Брест, 6–7 октября 2022 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, Брестский областной комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды ; редкол.: А. А. Волчек [и др.] ; науч. ред.: А. А. Волчек, О. П. Мешик. – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 88.

## REFERENCES

1. Safin, R. R. Energy Saving: A Modern Approach to Improving the Efficiency of Russian Woodworking Enterprises / R. R. Safin, A. V. Belyaeva // Woodworking Industry. – 2005. – No. 3. – P. 11-13.
2. Akhtyamov, F. Autonomous Way to Provide an Enterprise with Cheap Thermal Energy / F. Akhtyamov // LesPromInform. – 2008. – No. 2(51). – URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=596> (date of access: 27.02.2026).
3. Performance and emission analysis of an integrated cross-draft biomass gasifier and cyclonic burner with an air-mixing chamber for hot air generation in wood drying for international export / N. Unsomsri, S. Wiriyasart, S. Kaewluan // Thermal Science and Engineering Progress. – 2025. – Vol. 68. – Article 104198. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904925009898> (date of access: 27.02.2026).
4. Frantov, N. A. Improving the energy efficiency of convective chambers for wood drying : final qualifying work / N. A. Frantov ; Ivanovo State Power Engineering University. – Ivanovo, 2024. – 120 p.
5. Torrefaction of lignocellulosic residues / Fraunhofer Institute for Interfacial Engineering and Biotechnology IGB. – 2025. – URL: <https://www.igb.fraunhofer.de/en/research/thermal-separation-processes/torrefaction.html> (date of access: 27.02.2026).
6. Torrefaction of wood construction waste and eucalyptus blends for biofuel with enhanced energy density and low ash content / T. Barbosa, B. S. Chaves, L. G. O. Galvão [et al.] // 31<sup>st</sup> European Biomass Conference and Exhibition (EUBCE 2023) : proceedings. – Bologna, Italy, (5-8 June) 2023. – P. 157-163.
7. Physico-chemical processes during the torrefaction of lignocellulose raw materials / R. M. Khaziakhmedova, A. A. Makarov, G. M. Bikbulatova, V. N. Bashkirov ; scientific supervisor A. N. Grachev // Modern problems of nature management and environmental management : a collection of abstracts of the International scientific and practical Conference of young scientists dedicated to the 50th anniversary of the Department of Environmental Management, Brest, October 6-7, 2022 / Ministry of Education of the Republic of Belarus, Brest State Technical University, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection, Brest Regional Committee of Natural Resources and Environmental Protection ; editor: A. A. Volchek [et al.] ; scientific editors: A. A. Volchek, O. P. Meshik. – Brest : BrSTU, 2022. – P. 88.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ИНДИВИДУАЛЬНОМ ЖИЛИЩНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

### PROSPECTS FOR THE USE OF HEAT PUMP INSTALLATIONS FOR HEAT SUPPLY IN INDIVIDUAL HOUSING CONSTRUCTION

**Портнов В.В.**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплоэнергетики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Portnov V.V.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Орловцева О.А.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова», Москва, Россия

**Orlovitseva O.A.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

**Аннотация.** В связи с развитием технологии недорогого быстровозводимого жилья (БВЖ) в индивидуальном жилищном строительстве (ИЖС) одним из ключевых вопросов становится проблема выбора эффективной системы теплоснабжения. Одним из перспективных, недорогих и надежных решений является использование теплонасосных установок типа «воздух-воздух».

**Ключевые слова:** система теплоснабжения, теплонасосная установка, индивидуальное жилищное строительство.

**Abstract.** Due to the development of low-cost prefabricated housing technology in individual housing construction, one of the key issues is the problem of choosing an efficient heat supply system. One of the promising, inexpensive and reliable solutions is the use of air-to-air heat pumping units.

**Keywords:** heat supply system, heat pump system, individual housing construction.

В настоящее время наблюдается очередная волна популярности индивидуального загородного жилищного строительства. И не в последнюю очередь в этом сыграл факт значительного технического и технологического прогресса в создании и возведении быстровозводимого жилья. Основными видами являются:

- модульные дома – дом собирается из готовых блоков (модулей) с отделкой и коммуникациями, произведенных на заводе;
- каркасные дома – на участке возводится деревянный или металлический каркас, который утепляется и обшивается;
- домокомплекты (prefab-панели) – использование готовых стеновых панелей заводского изготовления, которые собираются на участке;

- дома из сэндвич-панелей (SIP-панелей) – строительство из крупных панелей (утеплитель + OSB), которые являются одновременно и стеной, и утеплителем;
- блочные дома – возведение стен из крупных блоков (газобетон, арболит).

Быстрые сроки возведения (от нескольких дней до 2-3 месяцев), относительно небольшой вес дома (что вполне может быть возведен на фундаменте из винтовых свай или на свайном/свайно-ростверчковом фундаменте), а так же меры государственной поддержки (льготная ипотека – для семей с детьми под 6 %, использование материнского капитала и эскроу-счетов, которые защищают средства покупателя) – все это привело к необычайной популярности БВЖ в загородном строительстве даже для семей с относительно небольшим достатком.

Но вот вопрос теплоснабжения возведенного жилища становится как правило актуальным уже в конце строительства (обычно в конце теплого сезона). При отсутствии магистрального газа стоимость участка для индивидуального жилого строительства обычно для Воронежской области не превышает 1-1,5 млн рублей. Наличие же введенного газа увеличивает эту цену минимум в полтора раза. Очень часто бывает «газ по границе участка» - в этом случае аффилированные с газоснабжающими структурами различные частные «фирмы-прослойки» просят от 250 тыс только за ввод на участок.

Из доступных централизованных энергоносителей остается, как правило, только электроэнергия, зачастую лимитированная по мощности (7-10 кВт).

В этом случае традиционный набор источников тепловой энергии невелик: твердое/жидкое топливо и электроэнергия.

Как следует из обзора [1], есть ряд серьезных недостатков у этих источников:

- твердое топливо (дрова, уголь, пеллеты, топливные брикеты и пр.) – требуют больших мест для хранения, защищенных от атмосферных осадков, постоянного контроля устройства для горения, сложность процессов автоматизации и дистанционного контроля горения, высокая стоимость;
- жидкое топливо (керосин, дизтопливо) – высокая стоимость, пожаровзрывоопасность, сложность хранения;
- электроэнергия (при прямом преобразовании в электронагревательных элементах) – высокая стоимость, значительная потребляемая мощность.

К тому же исторически сложилась в нашей стране приверженность к водяной системе теплоснабжения, в которой выработка тепла происходит в котле (электро или твердотопливном), передача по трубам и нагрев воздуха в помещении в нагревательных приборах (радиаторах, панелях, трубчатых регистрах).

Немного математики по ценам источников тепла:

- стоимость электрокотла для отопления частного дома зависит от его мощности, функциональности и производителя; цены на популярные модели начинаются от 8700 рублей за простые маломощные варианты и могут достигать 130000 рублей и выше для мощных устройств с расширенными возможностями; в среднем и малобюджетном варианте – до 20 тыс;
- стоимость твердотопливных котлов в 2026 году варьируется в очень широком диапазоне; на цену влияет множество факторов: тип котла, его мощность, материал

теплообменника, бренд и наличие автоматики; для дома в 100 кв. м обычно рекомендуют котел на 10-12 кВт, а для 200 м<sup>2</sup> – на 25-30 кВт; ориентировочные цены в зависимости от площади: 80–100 м<sup>2</sup> – 45000-70000 руб.; самые доступные – простые дровяные, далее по росту цен – модели длительного горения (от 50000 руб.), пиролизные (газогенераторные) котлы, с КПД до 90 % (от 80000 руб.), пеллетные с автоматической подачей топлива (от 150000 руб.).

Стоимость твердого топлива (для Воронежской области):

- от 1500 руб. (сосна) до 3000 (дуб) за кубометр дров без учета доставки (1500-2500 руб.);
- уголь от 10000 руб. за тонну без учета доставки;
- пеллеты – 16-25 руб./кг.

Стоимость электроэнергии для отопления сельский тариф начинается от 4,5 руб. за кВт\*ч и растет в зависимости от объема потребленной энергии в месяц.

Количество потребленного топлива за сезон (дом со средним утеплением с площадью 100 кв.м):

- 8-12 кубометров сухих дров на весь отопительный сезон;
- 5-8 тонн угля;
- пеллеты – 4,5 -6,5 тонн.

При отоплении электричеством в электродотлах или конвекторах – от 13 тыс. кВт\*ч за сезон.

В водяной системе отопления кроме котла затраты на трубы, арматуру, нагревательные приборы – от 100 тыс. руб., монтаж от 80 тыс.

При этом водяная система отопления имеет ряд недостатков (кроме описанной выше сложности и дороговизны монтажа):

- опасность протечек и «размораживания»: в системе под давлением находится большое количество воды, любое нарушение герметичности соединения или повреждение трубы приведет к протечке, которая может залить полы, испортить ремонт и мебель; при замерзании лед расширяется и разрывает трубы и радиаторы, полностью выводя систему из строя (можно избежать в случаях использования специальных незамерзающих жидкостей [2]);

- инерционность (медленный прогрев);
- сложность регулировки (современные системы с автоматикой позволяют гибко настраивать температуру, но нагрев помещений происходит медленно по-прежнему);
- зависимость от электричества (питание циркуляционного насоса), система же с естественной циркуляцией (гравитационная) еще более дорогая и сложная;
- сложность ремонта и обслуживания: заменить радиатор или трубу – надо сливать систему и останавливать теплоснабжение всего дома; теплоноситель периодически надо заменять и промывать систему.

В настоящее время все больше приобретает популярность использование теплонасосных установок для отопления дома [3].

История развития тепловых насосов охватывает несколько веков и связана с прогрессом в термодинамике и технологиях. В 1824 году французский физик Сади Карно описал теоретические основы циклов, которые позже стали ключевыми в работе холодильных машин и тепловых насосов. Его работа о тепловых двигателях заложила основу для понимания

преобразования тепловой энергии [4]. В 1852 году британский ученый лорд Кельвин (Уильям Томсон) предложил идею систем, способных переносить тепло, а не только вырабатывать его. Он предположил возможность использования низкопотенциальной энергии окружающей среды для обогрева помещений.

С момента практического воплощения (в 1912 году швейцарский инженер Генри Хопплер-Этдельвейс построил тепловой насос для обогрева здания в Цюрихе) до момента широкого применения прошло чуть более полувека. И в немалой степени этому поспособствовал мировой энергетический кризис 1970-х годов. С тех пор развитие теплонасосной техники пошло необычайно быстро.

Во многих странах применение теплонасосных установок было стимулировано правительствами многих стран.

В Германии действует федеральная программа BEG EM (Bundesförderung für effiziente Gebäude - Einzelmaßnahmen), которая предоставляет субсидии на установку тепловых насосов. Базовая субсидия составляет 25 % от инвестиционных затрат. Если тепловой насос заменяет устаревшую систему отопления (мазутную, газовую, угольную или ночную накопительную), работающую на ископаемом топливе, и использует природный хладагент, размер субсидии увеличивается до 40 %. Максимальная сумма поддержки – 60000 евро.

В США действуют как федеральные, так и региональные программы стимулирования. В рамках Закона о снижении инфляции (IRA) предусмотрена налоговая скидка в размере 30 % для тепловых насосов, сертифицированных ENERGY STAR. Также программа предлагает скидки на установку тепловых насосов для домохозяйств, отвечающих критериям дохода: до 8000 долларов США на систему для домохозяйств с низким доходом.

Ранее во Франции существовали налоговые кредиты на установку тепловых насосов. С 2005 года они покрывали 50 % инвестиционных затрат (с лимитом в 8000 евро за один тепловой насос или 16000 евро за несколько). В 2010 году ставки были скорректированы: для грунтовых тепловых насосов кредит составил 40 %, для воздушных – 25 %, для бытовых систем ГВС – 40 %. Позже ставки были снижены на 10 % для всех типов.

В Стратегии низкоуглеродного развития России до 2050 года, утвержденной в 2021 году, предусмотрены меры по стимулированию использования тепловых насосов в жилых и коммерческих объектах. В рамках интенсивного сценария стратегии планируется снизить чистые выбросы парниковых газов на 60 % к 2050 году по сравнению с уровнем 2019 года. Среди мер поддержки – энергоэффективное обновление систем отопления и горячего водоснабжения. Согласно Постановлению Правительства РФ от 17 июня 2015 года №600, тепловые насосы, использующие возобновляемые источники энергии (грунт, воду, воздух), признаны объектами и технологиями высокой энергетической эффективности. Это позволяет их производителям и пользователям претендовать на государственную поддержку, включая инвестиционный налоговый кредит.

Главный показатель эффективности теплового насоса – COP (Coefficient of Performance) – коэффициент преобразования производительности. Он показывает, во сколько раз количество переданного тепла превышает затраты на электроэнергию насоса. Если тепловой насос потребляет 1 кВт электроэнергии, а имеет COP = 3, то выдает 3 кВт тепловой энергии.

С понижением температуры источника COP снижается.

В настоящий момент промышленные тепловые насосы бывают в основном трех видов по типу забираемой из окружающей среды теплоты:

- «воздух-воздух» (источник – атмосферный воздух); самый популярный тип установок, занимающий около 2/3 мирового рынка (примерно \$40-44 млрд в 2025 году); их популярность обусловлена простотой установки и более низкой ценой по сравнению с другими типами;

- «грунт-вода»: тепло собирается из грунта с помощью горизонтальных коллекторов (укладка труб на глубине 1-3 метра) или вертикальных зондов (скважины глубиной 50-150 метров) и передается в систему отопления дома;

- «вода-вода»: тепло забирается из грунтовых вод (через скважину) или водоема и передается воде в системе отопления.

Современные тепловые насосы типа «воздух-воздух» – это высокотехнологичные устройства, которые по своей сути являются эволюционировавшими инверторными кондиционерами, оптимизированными для эффективной работы в режиме отопления, даже в условиях суровой зимы.

Чтобы обеспечивать эффективный обогрев зимой, современные тепловые насосы «воздух-воздух» оснащаются рядом усовершенствований по сравнению с обычными кондиционерами:

- работа при низких температурах: топовые модели рассчитаны на стабильную работу при температурах до  $-25^{\circ}\text{C}$ ... $-30^{\circ}\text{C}$ . Этого удается достичь за счет использования более мощных компрессоров (часто спирального типа с технологией EVI – подогревом пара), увеличенных теплообменников и эффективной автоматики;

- все современные модели являются инверторными: это означает, что компрессор работает не рывками (вкл/выкл), а плавно меняет свою производительность; это обеспечивает точное поддержание температуры, снижает уровень шума и экономит электроэнергию;

- защита от обмерзания: для работы зимой предусмотрены системы подогрева поддона наружного блока и картера компрессора, а также интеллектуальные алгоритмы оттаивания, которые предотвращают образование наледи и поддерживают эффективность;

- современные хладагенты: ГФУ-хладагенты (гидрофторуглероды, HFC) – это синтетические вещества, которые пришли на смену озоноразрушающим ХФУ (CFC) и ГХФУ (HCFC) в конце 20-го века; они широко использовались в холодильной технике и тепловых насосах, так как были безопасны для озонового слоя ( $\text{ODP} = 0$ );

- регулируемый дроссель – это важнейший элемент любого современного теплового насоса, который часто называют «сердцем» системы, отвечающим за правильное протекание хладагента по контуру; в отличие от простых капиллярных трубок в старых кондиционерах, современный дроссель является управляемым и адаптивным устройством.

Важно понимать, что тепловой насос не сжигает топливо и не создает тепло сам (в отличие от котла), он работает как «холодильник наоборот» и перемещает уже существующую тепловую энергию.

Стоимость теплового насоса для отопления дома до 100 кв. м составляет 180-200 тыс. руб., стоимость монтажа до 50 тыс. Время монтажа 1-2 суток.

При отсутствии магистрального газа тепловой насос является безальтернативным вариантом системы отопления, поскольку:

- имеет высокую скорость обогрева: помещение прогревается очень быстро, так как теплоносителем является непосредственно теплый воздух, а не промежуточный агент (вода или антифриз);

- высокая энергоэффективность: отсутствие промежуточного теплоносителя снижает тепловые потери и инерционность системы;

- отсутствие риска протечек и замерзания;

- равномерность прогрева;

- простота и безопасность эксплуатации;

- высокая степень автоматизации: может быть легко встроена в систему «умный дом».

Но есть у применения этих устройств и недостатки:

- работает хорошо в уже построенных домах только не более чем в два этажа и при возможности тепло и воздухообмена помещений между собой; при невозможности (например, спальни ночью – надо ставить электроконвекторы);

- необходимо ее конструкцию закладывать уже в проект дома (воздуховоды имеют большое сечение).

На сегодняшний день массовое применение тепловых насосов тормозится недоверием населения к такому типу отопления, недостатком грамотных специалистов для монтажа и обслуживания, требованием закладывать систему в проект дома и невозможностью реконструкции существующей системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камышева, Е. Е. Современные проблемы теплоснабжения загородного дома / Е. Е. Камышева, В. В. Портнов // Физико-технические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения : труды 22-й научно-технической конференции, Воронеж, 30 октября 2020 года. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2020. – С. 21-26.

2. Брагина, Л. П. О возможности применения антифризов в системах теплоснабжения / Л. П. Брагина, В. В. Портнов // Физико-технические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения : труды научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Выпуск 15. Воронеж, 11 ноября 2013 года. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2013. – С. 28-33.

3. Дахин, С. В. Энергосбережение при автономном низкотемпературном отоплении / С. В. Дахин, В. В. Портнов, Н. Н. Кожухов, А. В. Муравьев // Альтернативная и интеллектуальная энергетика : материалы II Международной научно-практической конференции, Воронеж, 16-18 сентября 2020 года. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2020. – С. 304-305.

4. Портнов, В. В. Холодильные установки: учеб. пособие / В. В. Портнов. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2014. – 98 с.

## REFERENCES

1. Kamysheva, E. E. Modern Problems of Heating a Country House / E. E. Kamysheva, V. V. Portnov // Physical and Technical Problems of Energy, Ecology, and Energy Conservation : Proceedings of the 22nd Scientific and Technical Conference, Voronezh, October 30, 2020. – Voronezh : Voronezh State Technical University, 2020. – P. 21-26.
2. Bragina, L. P. On the possibility of using antifreeze in heat supply systems / L. P. Bragina, V. V. Portnov // Physico-technical problems of energy, ecology and energy conservation : proceedings of the scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students., Issue 15. Voronezh, November 11, 2013. – Voronezh : Voronezh State Technical University, 2013. – P. 28-33.
3. Dakhin, S. V. Energy saving with autonomous low-temperature heating / S. V. Dakhin, V. V. Portnov, N. N. Kozhukhov, A. V. Muravyev // Alternative and intelligent energy: proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Voronezh, September 16-18, 2020. – Voronezh : Voronezh State Technical University, 2020. – P. 304-305.
4. Portnov, V. V. Refrigeration units: a textbook / V. V. Portnov. – Voronezh : Voronezh State Technical University, 2014. – 98 p.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ТОПЛИВОИСПОЛЬЗУЮЩИХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ  
СВЧ-КОНТРОЛЯ СВОБОДНОЙ ВЛАГИ**

**IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF FUEL-USING INSTALLATIONS THROUGH  
MICROWAVE CONTROL OF FREE MOISTURE**

**Прищепенко В.Ю.**, кандидат технических наук, старший преподаватель, ФГКВБОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

**Prishchepenko V.Yu.**, PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

**Внукова С.В.**, кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Vnukova S.V.**, PhD in Physics and Mathematics, Acting Head of the Electrical Engineering, Thermal Engineering and Hydraulics Department, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема влияния свободной воды в углеводородном топливе на энергоэффективность промышленных теплоэнергетических установок. Обоснована необходимость прецизионного контроля обводненности топлива для обеспечения энергобезопасности производства. Предложен резонаторный СВЧ-метод, отличающийся высокой чувствительностью к малым концентрациям влаги. Разработана математическая модель взаимодействия электромагнитного поля с каплями воды на диэлектрической подложке в цилиндрическом объемном резонаторе. Проведена экспериментальная верификация модели, подтверждающая возможность обнаружения объемов влаги менее 25 мкл. Применение данного метода позволяет предотвратить снижение теплотворной способности топлива и повысить общую энергоэффективность производства.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, качество топлива, свободная влага, СВЧ-контроль, объемный резонатор, теплотворная способность.

**Abstract.** The article deals with the problem of the influence of free water in hydrocarbon fuels on the energy efficiency of industrial heat and power plants. The necessity of precise control of water content in fuel to ensure the energy security of production is substantiated. A resonator microwave method with high sensitivity to low moisture concentrations is proposed. A mathematical model of the interaction of the electromagnetic field with water droplets on a dielectric substrate in a cylindrical cavity resonator has been developed. An experimental verification of the model was carried out, confirming the possibility of detecting moisture volumes of less than 25  $\mu$ l. The

application of this method makes it possible to prevent a decrease in the calorific value of fuel and increase the overall energy efficiency of production.

**Keywords:** energy efficiency, fuel quality, free water, microwave control, cavity resonator, calorific value.

Качество углеводородного топлива выступает основополагающим условием обеспечения энергоэффективности и надежности работы промышленных теплоэнергетических установок (газотурбинных двигателей, котельных, дизель-генераторов). Присутствие даже незначительного количества свободной воды (эмульсионной влаги) приводит к серьезным негативным последствиям: снижается теплота сгорания топливоздушная смеси, возрастает расход топлива для достижения номинальной мощности, интенсифицируются коррозионные процессы в топливной аппаратуре [1, 2]. Вопросы энергосбережения и повышения эффективности сжигания топлива находятся в центре внимания современных исследований в теплоэнергетике. Согласно отраслевым нормативам, содержание свободной воды в количестве 0,002 % уже считается критическим, так как может вызвать перебои в подаче топлива и нарушение режимов горения.

Существующие методы визуального контроля (отстаивание, осмотр в проходящем свете) обладают низкой точностью и субъективны, что не позволяет своевременно выявлять опасное обводнение. Физические методы, основанные на измерении диэлектрической проницаемости, являются более перспективными. Однако традиционные СВЧ-методы на «прохождение» и «отражение» в свободном пространстве [3] имеют высокую погрешность при малых объемах исследуемых проб и зависят от внешних условий (вибрации, юстировки антенн). Применение волноводных методов ограничено нижним порогом чувствительности на уровне 0,1 % из-за потерь в самом углеводороде.

Значительно повысить чувствительность контроля позволяет использование объемных резонаторов. В работе [4] показано, что резонаторные системы способны реагировать на присутствие капельной влаги объемом в единицы микролитров. Целью данной работы является адаптация резонаторного метода для задач оперативного контроля качества топлива в условиях промышленных предприятий с целью повышения энергоэффективности и безопасности эксплуатации теплоэнергетического оборудования.

В отличие от подхода, описанного в [4], где исследовались потери в топливе с растворенной влагой, данная работа фокусируется на диагностике свободной (эмульсионной) воды, которая оказывает наиболее дестабилизирующее влияние на процесс горения. Моделирование проведено для случая расположения капель воды малого объема на твердой диэлектрической подложке, помещенной в цилиндрический объемный резонатор (ЦОР) с колебанием типа  $H_{011}$ . Схема измерительной ячейки представлена на рисунке 1.

Выбор материала подложки (пенополистирол ПСБ-С 15,  $\varepsilon \approx 1$ , толщина  $h_0 = 22$  мм) обусловлен минимальным возмущением электромагнитного поля резонатора, низкими собственными диэлектрическими потерями и гидрофобностью, что обеспечивает формирование капель, близких по форме к сферической [5]. Капли располагались в пучности электрического поля (середина радиуса ЦОР).

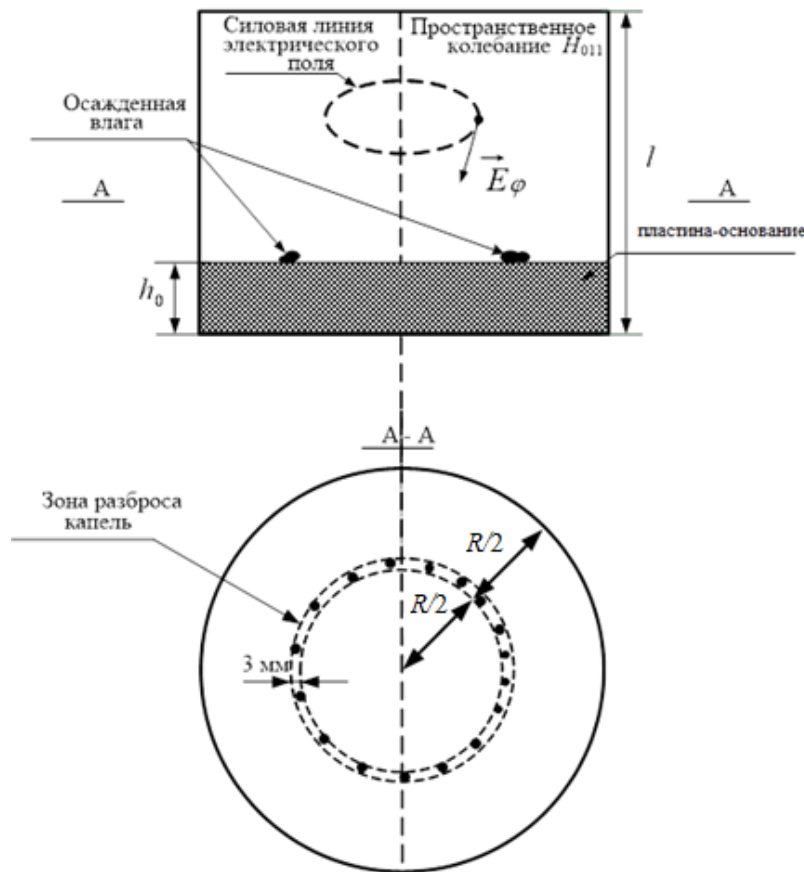


Рисунок 1 – Резонаторная ячейка для диагностики влаги с пластиной-основанием из пенополистирола

Для описания потерь, вносимых каплями воды, была использована модель поля внутри сферического включения. Напряженность поля внутри капли  $E_{ш}$ , находящейся в воздушной среде, связана с невозмущенным полем резонатора  $E_{\varphi}$  соотношением, вытекающим из решения задачи дифракции на малом шаре [5]:

$$E_{ш} = E_{\varphi} \frac{3\varepsilon_{уг}}{2\varepsilon_{уг} + \varepsilon' + i\varepsilon''}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{уг}$  – относительная диэлектрическая проницаемость углеводорода (в модели с воздухом  $\varepsilon_{уг} = 1$ );  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости воды соответственно.

Парциальная добротность  $Q_{вл}$ , определяемая потерями в каплях влаги, может быть рассчитана как отношение запасенной в резонаторе энергии  $W_{зан}$  к энергии потерь в каплях  $W_{пот}$  за период. Запасенная энергия для колебания  $H_{011}$  в ЦОР радиусом  $R$  и высотой  $l$  определяется интегрированием квадрата амплитуды магнитного поля  $H_{\varphi}$ . Энергия потерь в  $N$  каплях суммарным объемом  $V_{вл}$ , расположенных в области с напряженностью поля  $E_0$  (значение  $E_{\varphi}$  в месте расположения капель), с учетом (1) равна:

$$W_{пот} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon'' |E_{ш}|^2 V_{вл} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon'' E_0^2 \left| \frac{3}{2 + \varepsilon' + i\varepsilon''} \right|^2 V_{вл}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

После математических преобразований с использованием выражений для компонент поля колебания  $H_{011}$ , получено аналитическое выражение для парциальной добротности, обусловленной наличием влаги:

$$Q_{вл} = \frac{2\pi l \int_0^R J_1^2\left(\frac{\chi_{01}}{R} r\right) r dr}{\varepsilon'' \left| \frac{3}{2 + \varepsilon' + i\varepsilon''} \right|^2 \cdot \frac{V_{вл}}{V_0}}, \quad (3)$$

где  $J_1$  – функция Бесселя первого рода;  $\chi_{01}$  – первый корень производной функции Бесселя;  $r$  – текущая радиальная координата;  $V_0$  – нормировочный объем (эффективный объем области взаимодействия).

На основании (3) и известной формулы для нагруженной добротности системы

$$Q_n = \frac{Q_0 Q_{вл}}{Q_0 + Q_{вл}}, \quad (4)$$

где  $Q_0$  – добротность пустого резонатора с подложкой, было получено выражение, связывающее объем влаги с измеряемым изменением добротности:

$$V_{вл} = K \frac{Q_0 - Q_n}{Q_0 Q_n}, \quad (5)$$

где  $K$  – калибровочный коэффициент, определяемый геометрией резонатора и свойствами воды:

$$K = \frac{\int |E_\varphi|^2 dV}{\varepsilon'' E_0^2 \left| \frac{3}{2 + \varepsilon' + i\varepsilon''} \right|^2}. \quad (6)$$

Экспериментальная проверка разработанной модели проводилась на измерительной установке, включающей резонатор и скалярный измеритель цепей Р2М-18. Дозирование влаги осуществлялось автоматическим пипет-дозатором Hamilton Sof Touch с дискретностью 0,1-2 мкл (погрешность не более 1,5 %). Для каждого значения объема влаги готовилось по 10 проб (доверительная вероятность  $P_{дов} = 0,95$ ). Результаты сравнения теоретических и экспериментальных значений нагруженной добротности приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость нагруженной добротности резонатора от объема свободной влаги на подложке

$V_{вл}$ , мкл	0	25	50	100
$Q_n^{теор}$	27730	23590	20520	16290
$Q_n^{эксп}$	$27730 \pm 700$	$23200 \pm 1000$	$19900 \pm 950$	$15700 \pm 950$

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Теоретические значения нагруженной добротности находятся внутри доверительных интервалов экспериментальных данных, что подтверждает адекватность предложенной математической модели.

2. Наблюдаемое систематическое занижение средних экспериментальных значений относительно теоретических объясняется технологическими трудностями позиционирования множества мелких капель строго по окружности радиуса  $R/2$ , а также неизбежным разбросом их размеров.

3. Высокая чувствительность метода подтверждается надежной регистрацией изменения добротности при объеме влаги 25 мкл (снижение на 16 % от исходного значения), что соответствует концентрациям, значительно более низким, чем пределы обнаружения традиционных методов.

Таким образом, разработанная модель СВЧ-потерь в каплях воды, расположенных на диэлектрической подложке в объемном резонаторе, демонстрирует хорошее согласие с экспериментом. Это открывает перспективы для создания промышленных анализаторов качества топлива, работающих в потоке или при контроле проб.

Внедрение резонаторных СВЧ-влажномеров в систему входного контроля топлива на теплоэлектростанциях и промышленных котельных позволит повысить энергоэффективность за счет исключения сжигания обводненного топлива с пониженной теплотворной способностью и обеспечить энергобезопасность производства путем предотвращения аварийных остановов оборудования, вызванных попаданием воды в топливную систему, а также снизить эксплуатационные затраты на ремонт форсунок и топливных насосов высокого давления. Данный подход соответствует современным тенденциям в области энергосбережения, где приоритет отдается прецизионному контролю параметров топлива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников, М. Е. Химия и авиационные горючие и смазочные материалы: учебник для слушателей инж. фак. ВВУЗов ВВС / М. Е. Резников, Г. К. Старостенко; Под ред. М. Е. Резникова. – Москва : б. и., 1977. – 300 с.

2. Ткач, Н. С. Экспериментальное исследование влияния влагосодержания на теплотехнические характеристики топочного мазута / Н. С. Ткач, А. А. Еськин, А. С. Рудинков // Технические науки – от теории к практике : Сборник статей по материалам XXXIX международной научно-практической конференции, № 10(35). – Новосибирск: Издательство «СибАК», 2014. – С. 63-71.

3. Мищенко, С. В. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов: учеб. пособие / С. В. Мищенко, Н. А. Малков. – Тамбов : Издательство Тамбов. гос. техн. ун-та, 2003. – 127 с.

4. A Study of Losses in Fuel with Dissolved and Emulsified Moisture at Ultrahigh Frequencies / V. V. Volkov, M. A. Suslin, V. N. Mel'kumov, V. Yu. Prishchepenko, // Measurement Techniques. – 2016. – Vol. 59, No. 3. – P. 331-337.

5. Матюхин, С. И. Форма капель жидкости, помещенных на твердую горизонтальную поверхность / С. И. Матюхин, К. Ю. Фроленков // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2013. – Т. 15, № 3. – С. 292-304.

#### REFERENCES

1. Reznikov, M. E. Chemistry and Aviation Fuels and Lubricants: Textbook for Students of Engineering Faculties of Air Force Higher Education Institutions / M. E. Reznikov, G. K. Starostenko; Edited by M. E. Reznikov. – Moscow : b. i., 1977. – 300 p.

2. Tkach, N. S. Experimental study of the effect of moisture content on the thermal characteristics of fuel oil / N. S. Tkach, A. A. Eskin, A. S. Rudinkov // Technical Sciences: From Theory to Practice : Collection of Articles Based on the Materials of the XXXIX International Scientific and Practical Conference, No. 10(35). – Novosibirsk : SibAK Publishing House, 2014. – P. 63-71.

3. Mishchenko, S. V. Design of Radio Wave (Microwave) Devices for Non-Destructive Testing of Materials : Textbook / S. V. Mishchenko, N. A. Malkov. – Tambov : Publishing House of Tambov State Technical University, 2003. – 127 p.

4. A Study of Losses in Fuel with Dissolved and Emulsified Moisture at Ultrahigh Frequencies / V. V. Volkov, M. A. Suslin, V. N. Mel'kumov, V. Yu. Prishchepenko, // Measurement Techniques. – 2016. – Vol. 59, No. 3. – P. 331-337.

5. Matyukhin, S. I. Shape of liquid drops on solid horizontal surface / S. I. Matyukhin, K. Yu. Frolenkov // Condensed Matter and Interphases. – 2013. – Vol. 15, No. 3. – P. 292 – 304.

## ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ НА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ SOLAR POWERED AIRCRAFT

**Рыжков В.В.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Ryzhkov V.V.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Кольцова А.В.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Koltsova A.V.**, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Золотарев А.В.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Zolotarev A.V.**, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье рассматривается история развития и современное состояние авиации, использующей солнечную энергию. Анализируются конструктивные особенности и принципы работы солнечных летательных аппаратов, а также приводятся примеры наиболее известных мировых и российских проектов в данной области.

**Ключевые слова:** солнечная энергия, авиация, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), атмосферный спутник, солнечные батареи, Sunrise I, Solara, SolarImpulse, альтернативные источники энергии.

**Abstract.** The article examines the history of development and the current state of solar-powered aviation. It analyzes the design features and principles of operation of solar-powered aircraft, and provides examples of the most well-known global and Russian projects in this field.

**Keywords:** solar energy, aviation, unmanned aerial vehicles (UAVs), atmospheric satellite, solar panels, Sunrise I, Solara, Solar Impulse, alternative energy sources.

Современная авиация является одним из главных символов технического прогресса. Каждую секунду в небе находится 12 тысяч самолётов, ежегодно авиакомпании перевозят 4,1 миллиарда человек [1]. Одной из проблем авиации является экологический фактор. Авиационный транспорт является одним из самых быстрорастущих источников парниковых газов. Помимо этого, самолеты зависят от ископаемого топлива. Авиационный керосин составляет значительную часть расходов любой авиакомпании, а цены на него нестабильны и привязаны к мировой политике. Таким образом, инженеры авиастроения стараются перейти на альтернативные источники энергии, в основном таким источником является солнечный свет. В отличие от биотоплива или водорода, он доступен повсеместно, а, главное, бесплатен, задача состоит лишь в том, как эффективно собирать его прямо в полете.

С помощью солнечных батарей или панелей люди научились преобразовывать энергию фотонов в электроэнергию, это изобретение позволило создать солнечный самолет, который не требует заправки топливом, в отличие от привычного нам летательного аппарата. Принцип работы прост, днем он летает, заряжая солнечные батареи, а ночью использует накопленную энергию, что позволяет ему летать круглосуточно. Самолеты такого типа бывают как пилотируемые, так и не пилотируемые.

Область применения солнечных беспилотных аппаратов достаточно обширна, ведь они могут заменить спутники, их можно применять для ретрансляции сигнала связи, наблюдения за землей и атмосферой, распространением интернета в труднодоступных местах и т.д.

История практического применения солнечной энергии в авиации началась в середине 1970-х годов. Перед инженерами стал вопрос о том, можно ли поднять в небо аппарат, используя только солнечную энергию. Первым таким летательным аппаратом, который смогли поднять в воздух, стал беспилотник Sunrise I (рисунок 1), созданный американским инженером Роландом Баучером. Летные испытания начались в 1974 году на озере Байсикл-Лейк в Калифорнии. Первые полеты проводились на аккумуляторах с использованием банджи-троса для запуска на высоту до 20 футов (6 м). Во время первого полета самолет поднялся на высоту 500 футов, после чего вернулся на посадку [2].



Рисунок 1 – Sunrise I во время испытательных полетов

Испытания затянулись из-за недостатка солнечных дней, в общей сложности было совершено 28 полетов. Сначала Sunrise I медленно набирал высоту, пока солнечные батареи не остывали и их эффективность не повышалась. 28-й полет стал последним для испытательного беспилотника, он был разрушен, подлетев слишком близко к кучевому облаку на высоте более 2000 метров.

Несмотря на то, что Sunrise I не мог летать ночью, его полеты доказали саму концепцию применения солнечной энергии в авиации. На сегодняшний день самые известные летательные аппараты использующие солнечную энергию - это Solara 50 и Solara 60, Solarimpulse, Сова.

Solara 50 (рисунок 2) – первый в мире беспилотный летательный аппарат на солнечной энергии, который может функционировать в качестве атмосферного спутника. В 2013 году в

Вашингтоне на выставке Международной ассоциации беспилотных систем (AUVSI) Компания Titan Aerospace представила данный летательный аппарат.



Рисунок 2 – Solara 50 и Solara 60

В настоящее время Solara 50 может эксплуатироваться в течение 5 лет над облаками, закрывающими солнце. Он может перевозить около 30 кг телекоммуникационного, разведывательного, атмосферного и другого полезного оборудования. Также Titan разрабатывает Solara 60, который сможет перевозить до 100 кг. БПЛА Solara имеют один двигатель с воздушным винтом большого диаметра, подпитываемый энергией солнечных батарей, которые размещены по всей поверхности крыльев. Солнечные батареи дают до семи киловатт мощности, часть которой идет на подзарядку литий-ионных аккумуляторов для работы электромотора в ночное время [3].

Швейцарские пионеры Бертан Пикар и Андре Боршберг поставили перед собой цель облететь Землю на пилотируемом самолете. Для кругосветного путешествия был построен SolarImpulse (рисунок 3), который имел размах крыла 72 метра и максимальную взлетную массу 2300 кг, на крыльях разместили более 17000 фотоэлементов, которые днем питали электромоторы и заряжали батареи, позволяя лететь ночью крейсерская скорость составила 70 км/ч.



Рисунок 3 – SolarImpulse

Впервые он был представлен публике 9 марта 2014 г. швейцарским аэронавтом Бертраном Пикаром [4]. Стартовав в марте 2015 года из Абу-Даби, самолет совершил

кругосветное путешествие, пройдя через все континенты. Самым сложным стал перелет из Японии на Гавайи протяженностью 8500 км, самолет был в воздухе без посадок 118 часов (почти 5 суток), что стало мировым рекордом продолжительности полета. Финиш состоялся 26 июля 2016 года там же, в Абу-Даби. SolarImpulse доказал, что современные технологии позволяют летать без топлива неограниченно долго, ограничивая лишь возможности пилота.

Атмосферный спутник «Сова» (рисунок 4) – это перспективный российский беспилотный летательный аппарат, разработанный научным предприятием «Тайбер» при поддержке Фонда перспективных исследований (ФПИ). Главной задачей проекта является создание аппарата, который заменит дорогостоящие низкоорбитальные спутники и будет выполнять такие задачи, как ретрансляция сигналов связи, оптическая разведка и мониторинг земной поверхности в труднодоступных районах, включая Арктику. Летом 2016 года начались испытания Совы, первый прототип успешно совершил полет в небе над Орловской областью. Демонстратор технологий успешно завершил двухсуточный беспосадочный полет на солнечных батареях [5]. Этот экспериментальный образец, обладавший размахом крыла 9 метров и массой всего 12 кг, провел в воздухе 50 часов, поднявшись на высоту до 9000 м. Уже к 2017 году стало известно о подготовке к испытаниям второго усовершенствованного прототипа с размахом крыла 28 метров, рассчитанного на полеты на высоте около 20 километров. По словам экспертов, Сова может стать ретранслятором для обеспечения устойчивой связи с кораблями в Мировом океане и военными базами на арктических островах, а также для патрулирования Северного морского пути.



Рисунок 4 – Сова

Таблица 1 – Технические характеристики летательных аппаратов

Модели летательных аппаратов	Sunrise I	Solara 50 и Solara 60	Solarimpulse	Сова
Размах крыльев	9,8 м	60 м	72 м	28 м
Скорость	22 км/ч	105 км/ч	70 км/ч	210 км/ч
Высота полета	2 км	20 км	8,5 км	15-20 км
Максимальная взлетная масса аппарата	12 кг	30 и 100 кг	2300 кг	1000 кг

Пройдя путь от хрупких моделей 1970-х годов до коммерческой эксплуатации стратосферных беспилотных аппаратов, солнечная авиация доказала свою жизнеспособность.

Солнечная энергия в авиации – это стратегическое направление, которое в ближайшие время изменит облик отрасли. Авиация перестанет зависеть от цен на нефть. Страны с большим количеством солнечных дней могут стать лидерами новой эпохи.

Современные технологии – это лишь фундамент. Настоящая революция начнется с приходом новых материалов. Ученые уже создают гибкие солнечные пленки на основе перовскитов, которые можно интегрировать прямо в обшивку крыла, их КПД приближается к 40 %. Переход на твердотельные аккумуляторы увеличит плотность хранения энергии в 2-3 раза, позволяя летать всю ночь с коммерческой нагрузкой.

Обратить внимание на эту тему стоит потому, что она показывает предел возможностей человеческой инженерии. Когда мы сможем летать, не сжигая ничего, а просто потребляя солнечный свет – это будет не просто новый самолет, а новая философия полета.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационная безопасность // Журнал пилот. – URL: <https://pilot-online.ru/aviation-security/> (дата обращения: 01.03.2026).
2. Astro Flight Sunrise // Wikipedia. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/AstroFlight\\_Sunrise](https://en.wikipedia.org/wiki/AstroFlight_Sunrise) (дата обращения: 01.03.2026).
3. Воронин, А. П. Солнечная энергия в авиации / А. П. Воронин, В. В. Рыжков, В. В. Самохвалов // Альтернативная и интеллектуальная энергетика: Материалы II Международной научно-практической конференции, Воронеж, 16-18 сентября 2020 года. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2020. – С. 231-232.
4. SolarImpulse 2 // РИА Новости. – URL: <https://ria.ru/SolarImpulse2> (дата обращения: 01.03.2026).
5. Масштабная модель атмосферного спутника «Сова» // Сайт производителя «Тайбер». – URL: <http://www.tiber.su/produksiya-2/masshtabnaya-model-atmosfernogo-sputnika-sova> (дата обращения: 01.03.2026).

### REFERENCES

1. Aviation Security // Pilot Magazine. – URL: <https://pilot-online.ru/aviation-security/> (date of access: 01.03.2026).
2. Astro Flight Sunrise // Wikipedia. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/AstroFlight\\_Sunrise](https://en.wikipedia.org/wiki/AstroFlight_Sunrise) (date of access: 01.03.2026).
3. Voronin, A. P. Solar energy in aviation / A. P. Voronin, V. V. Ryzhkov, V. V. Samokhvalov // Alternative and intelligent energy: Proceedings of the II International scientific and practical conference, Voronezh, September 16-18, 2020. – Voronezh : Voronezh State Technical University, 2020. – P. 231-232.
4. Solar Impulse 2 // RIA Novosti. – URL: <https://ria.ru/SolarImpulse2> (date of access: 01.03.2026).
5. Scale Model of the Sova Atmospheric Satellite // Tiber manufacturer's website. – URL: <http://www.tiber.su/produksiya-2/masshtabnaya-model-atmosfernogo-sputnika-sova> (date of access: 01.03.2026).

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ВОДОПОДГОТОВКИ КОТЕЛЬНЫХ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF REVERSE OSMOSIS FILTERS FOR WATER  
TREATMENT IN RESIDENTIAL COMPLEX BOILER ROOMS

**Сидорова М.А.**, студент, ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова», Москва, Россия

**Sidorova M.A.**, Student, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

**Орловцева О.А.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова», Москва, Россия

**Orlovitseva O.A.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

**Портнов В.В.**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплоэнергетики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

**Portnov V.V.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье рассматриваются перспективы применения обратноосмотических фильтров в системах водоподготовки котельных, обслуживающих жилые комплексы. Проведен сравнительный анализ двух методов очистки воды: натрий-катионитовых фильтров и установок обратного осмоса. Исследовано влияние качества питательной воды на потери тепла с продувкой котлов, экологические аспекты утилизации стоков и долговечность оборудования ГВС. Установлено, что применение обратного осмоса позволяет снизить тепловые потери, исключить использование реагентов и образование засоленных стоков, продлить срок службы трубопроводов. Сделан вывод о перспективности внедрения обратноосмотических фильтров в котельных жилых комплексов.

**Ключевые слова:** водоподготовка, котельная, натрий-катионитовые фильтры, обратный осмос, энергоэффективность, экологическая безопасность, жилые комплексы.

**Abstract.** The article discusses the prospects of using reverse osmosis filters in water treatment systems of boiler houses serving residential complexes. A comparative analysis of two water purification methods is carried out: sodium-cation exchange filters and reverse osmosis units. The influence of feed water quality on heat losses with boiler blowdown, environmental aspects of waste disposal and durability of hot water supply equipment is studied. It is found that reverse osmosis reduces heat losses, eliminates reagent use and saline waste formation, and extends pipeline service life. It is concluded that reverse osmosis filters are promising for boiler houses in residential complexes.

**Keywords:** water treatment, boiler house, sodium-cation exchange filters, reverse osmosis, energy efficiency, environmental safety, residential complexes.

Котельные являются ключевым звеном в системе теплоснабжения современных населенных пунктов и промышленных объектов, поскольку они обеспечивают выработку тепловой энергии, необходимой для отопления жилых и административных зданий, вентиляции и горячего водоснабжения, а на производственных площадках – еще и снабжают технологические линии паром требуемых параметров. От того, насколько стабильно и эффективно функционирует котельное оборудование, напрямую зависит не только комфорт людей, но и бесперебойность протекания производственных циклов на предприятиях.

Поскольку процесс химической водоподготовки (далее – ХВО) сопряжен с потреблением значительных объемов жидкости, выступающей в роли теплоносителя, вопрос ее качества приобретает первостепенное значение: подаваемая в котел вода должна неукоснительно соответствовать нормам, зафиксированным в технической документации завода-изготовителя, так как присутствие в ней посторонних примесей способно нанести серьезный урон дорогостоящему оборудованию, в частности, содержащиеся в исходной воде механические взвеси, соли жесткости, соединения железа и органика провоцируют образование накипи на внутренних поверхностях и активизируют коррозионные процессы [1]. Даже относительно тонкий слой накипи, отличающийся низкой теплопроводностью, становится причиной резкого падения коэффициента полезного действия котла: существенно возрастает расход потребляемого топлива и электроэнергии, а скорость нагрева теплоносителя неуклонно снижается [2]. Очевидно, что проведение профилактических мероприятий по очистке воды обходится значительно дешевле, чем последующий ремонт или полная замена вышедшей из строя аппаратуры, что подтверждает высокую экономическую эффективность грамотно организованной водоподготовки.

Для доведения параметров исходной воды до требуемых нормативов, обеспечивающих безаварийную работу котельного оборудования, применяются различные методы очистки. Выбор конкретной технологии зависит от состава исходной воды, типа установленных котлов и экономической целесообразности. В первую очередь системы химводоочистки удаляют растворенные соединения кальция и магния, обуславливающие жесткость воды. Указанные соединения обладают отрицательной температурной растворимостью и при нагреве уже свыше 40 °С образуют на поверхностях нагрева котлов слой отложений с высокой механической прочностью – накипь.

На сегодняшний день в системах химической водоподготовки котельных наибольшее распространение получили два принципиально разных подхода умягчения/обессоливания воды: ионный обмен и мембранная фильтрация. Первый реализуется в натрий-катионитовых фильтрах, второй – в установках обратного осмоса [3].

Натрий-катионитовые фильтры представляют собой наиболее распространенный тип оборудования для умягчения воды в котельных, работающий на основе ионообменной технологии [4]. Конструктивно фильтр выполнен в виде вертикального корпуса из углеродистой стали, заполненного гранулированной ионообменной смолой (катионитом) и оснащенного распределительными устройствами для равномерной подачи воды и отведения

фильтра. Принцип действия натрий-катионитового фильтра основан на способности ионообменной смолы поглощать из воды одни ионы и отдавать в нее взамен другие. Когда исходная вода проходит через слой катионита, содержащиеся в ней ионы жесткости (кальций  $\text{Ca}^{2+}$  и магний  $\text{Mg}^{2+}$ ) захватываются смолой и удерживаются ею, тогда как сама смола высвобождает в воду эквивалентное количество ионов натрия ( $\text{Na}^+$ ). В результате такого ионного обмена вода теряет способность к образованию накипи, поскольку соли жесткости остаются в фильтре, однако общее солесодержание воды практически не снижается – происходит лишь замена одних растворенных солей на другие [5]. По мере исчерпания обменной емкости смолы фильтр выводят на регенерацию, пропуская через него раствор поваренной соли ( $\text{NaCl}$ ), который восстанавливает первоначальные свойства загрузки и позволяет вернуть фильтр в рабочий цикл.

Для систем водоподготовки, обслуживающих жилые комплексы с круглосуточным потреблением горячей воды, как правило, применяются двухступенчатые схемы умягчения. В таких установках вода последовательно проходит через два фильтра, что позволяет не только повысить глубину очистки, но и обеспечить непрерывность процесса: пока одна ступень работает в режиме водоподготовки, другая может находиться на регенерации, благодаря чему подача умягченной воды потребителям не прекращается, что является существенным преимуществом. Главным достоинством натрий-катионитовых фильтров является их высокая эффективность в умягчении воды, позволяющая снизить жесткость до 0,1-0,05 мг-экв/л и ниже, что полностью соответствует требованиям, предъявляемым к питательной воде паровых и водогрейных котлов большинством нормативных документов. Данный метод характеризуется сравнительно невысокими капитальными затратами, что делает его доступным для применения в условиях ограниченного бюджета [5].

Однако натрий-катионирование имеет ряд существенных недостатков. Главный из них заключается в том, что технология удаляет из воды ионы жесткости, но не снижает общего солесодержания, поскольку происходит лишь замена ионов кальция и магния на эквивалентное количество ионов натрия. В результате питательная вода остается высокоминерализованной, что вынуждает поддерживать повышенный процент продувки котла для удаления избытка солей, а это ведет к прямым тепловым потерям и перерасходу топлива. Для регулярной регенерации фильтров требуется значительное количество поваренной соли (до нескольких тонн в месяц для средней котельной), что создает проблемы с доставкой и хранением реагентов. Наконец, сбросные воды после регенерации представляют собой высококонцентрированные солевые растворы, утилизация которых затруднительна и наносит ущерб окружающей среде [5].

В отличие от ионообменных технологий, основанных на химическом взаимодействии, мембранные методы очистки воды представляют собой физические процессы разделения, при которых исходная вода под давлением пропускается через полупроницаемую перегородку – мембрану. Сама идея мембранного разделения была смоделирована с биологических процессов, происходящих в живой клетке, оболочка которой представляет собой природную полупроницаемую мембрану. Способность мембран задерживать различные типы загрязнений напрямую определяется размером их пор: от крупных механических взвесей до отдельных ионов растворенных солей [6]. В зависимости от размеров пор и, соответственно, от

фильтрующей способности различают несколько основных типов мембранной фильтрации [6]. Первым из них является микрофильтрация (размер пор 0,1-1,0 мкм), которая удаляет механические примеси, бактерии и вирусы, представляя собой самый «грубый» мембранный метод, близкий к обычной фильтрации. Далее следует ультрафильтрация (размер пор 0,01-0,1 мкм), задерживающая высокомолекулярные соединения (белки, жиры), коллоидные частицы, а также вирусы. Нанофильтрация (размер пор 0,001-0,01 мкм) позволяет удалять из воды многовалентные ионы, в том числе ионы жесткости – кальций и магний, а также органические вещества. Наконец, обратный осмос (размер пор 0,0001-0,001 мкм) является самым тонким методом очистки, при котором разделение происходит на молекулярном уровне; мембраны обратного осмоса способны задерживать до 99 % всех растворенных веществ, включая одновалентные ионы натрия, хлориды и сульфаты.

Наибольший интерес для систем водоподготовки котельных представляют две последние категории, однако именно обратный осмос обеспечивает наиболее глубокую очистку, принципиально отличаясь от натрий-катионитового метода не только механизмом действия, но и конечным результатом.

Установки обратного осмоса представляют собой современное высокотехнологичное оборудование для глубокой очистки воды, которое в последние десятилетия активно внедряется на реконструируемых и вновь строящихся объектах теплоэнергетики. В отличие от ионообменных фильтров, данный метод позволяет не просто умягчать воду, а осуществлять ее комплексное обессоливание, задерживая подавляющее большинство растворенных примесей среде [5].

Основным рабочим элементом установки является полупроницаемая мембрана, выполненная из композитных полимерных материалов и свернутая в рулонный модуль для обеспечения максимальной площади фильтрации при компактных размерах оборудования. В состав установки также входят насос высокого давления, создающий необходимое рабочее давление (обычно от 10 до 25 атмосфер в зависимости от типа мембран и исходной воды), система предварительной механической очистки воды для защиты мембран от засорения, а также блок автоматики, управляющий всеми технологическими процессами. Принцип действия обратного осмоса основан на явлении фильтрации на молекулярном уровне. Если при естественном осмосе вода стремится проникнуть через мембрану в сторону более концентрированного раствора, выравнявая концентрации, то обратный осмос – это процесс, обратный природному: внешнее давление, превышающее осмотическое давление раствора, заставляет молекулы воды двигаться в противоположном направлении – из концентрированного раствора в чистую воду. Структура мембраны такова, что она содержит микропоры размером, сопоставимым с размером молекул воды (порядка одного ангстрема). Молекулы воды способны беспрепятственно проходить сквозь мембрану, тогда как практически все растворенные в воде вещества задерживаются и отводятся с потоком концентрата в дренаж [5].

В результате процесса на выходе установки формируются два самостоятельных потока: пермеат (фильтрат) – чистая, глубоко обессоленная вода, которая направляется в баки запаса и далее в котел, и концентрат – вода с повышенным содержанием всех отфильтрованных солей и примесей, сбрасываемая в систему водоотведения. Степень задержания растворенных

веществ современными мембранами достигает 96-98 % [3], что позволяет получать воду, по своим характеристикам приближающуюся к дистиллированной.

Представленные характеристики обратного осмоса демонстрируют принципиально иной уровень очистки воды по сравнению с натрий-катионитовым методом, и это различие становится определяющим фактором при выборе технологии для котельных, обслуживающих жилые комплексы. Если натрий-катионитовые фильтры лишь заменяют ионы жесткости на ионы натрия, не снижая общего солесодержания воды, то фильтры обратного осмоса действительно удаляют растворенные соли, приближая качество воды к дистиллированной, и именно это фундаментальное отличие формирует целый ряд преимуществ, делающих осмотическую технологию более предпочтительной для применения в жилом секторе.

Прежде всего, необходимо обратить внимание на энергетическую эффективность, от которой зависит экономическая целесообразность эксплуатации оборудования, что становится одним из ключевых показателей работы любой котельной установки. Поскольку умягчение воды натрий-катионитовыми фильтрами не снижает ее общего солесодержания, а даже несколько повышает его за счет замены ионов кальция и магния на ионы натрия, то вода, поступающая в котел, сохраняет высокую минерализацию, что, в свою очередь, вынуждает поддерживать повышенный процент непрерывной продувки котлов, необходимой для удаления избытка концентрирующихся солей и поддержания их допустимой концентрации в котловой воде. Однако, каждый процент продувки означает прямые потери тепла, так как нагретая до высоких температур вода сбрасывается в дренаж, и эти потери неизбежно компенсируются дополнительным расходом топлива. Переход на обратноосмотическую технологию позволяет кардинально изменить ситуацию: глубокая деминерализация воды обеспечивает настолько низкое содержание солей в питательной воде, что продувку котлов можно сократить до минимальных значений [7]. В масштабах жилого квартала, где котельная работает круглосуточно на протяжении всего отопительного сезона и потребляет значительные объемы топлива, такая разница дает колоссальный экономический эффект, выражающийся в тоннах сэкономленного газа и, соответственно, в снижении финансовой нагрузки на теплоснабжающие организации и конечных потребителей.

Не менее важным аспектом, который приобретает особую значимость именно в условиях жилой застройки, является экологическая безопасность, поскольку котельные, обслуживающие жилые комплексы, зачастую располагаются либо встроенно-пристроено к самим зданиям, либо на минимальном удалении от них, а значит, любые вредные выбросы или сбросы оказываются в непосредственной близости от людей. При эксплуатации натрий-катионитовых фильтров, как уже отмечалось, возникает необходимость в регулярной регенерации ионообменной смолы с использованием поваренной соли, причем для котельной средней производительности расход соли может достигать нескольких тонн в месяц, а объем образующихся при регенерации солевых стоков пропорционален количеству израсходованной соли, что может повлечь за собой образование значительных объемов высококонцентрированных солевых стоков, которые сбрасываются в канализацию после каждой регенерации. Такие рассолы создают серьезную дополнительную нагрузку на городские очистные сооружения, а в случае любых нештатных ситуаций или нарушений герметичности систем существует реальный риск засоления грунтов и грунтовых вод, что в

условиях плотной жилой застройки совершенно недопустимо. Установки обратного осмоса, напротив, не требуют для своей работы никаких химических реагентов – процесс разделения воды и примесей происходит исключительно за счет физического воздействия, а именно за счет создания высокого давления, продавливающего воду сквозь мембрану. Образующийся в процессе осмоса концентрат представляет собой не агрессивный химический раствор, а ту же исходную воду, но с повышенным содержанием отфильтрованных солей, и такой сток не требует специальной нейтрализации или сложной утилизации [8]. При условии соблюдения нормативных требований сток может отводиться в централизованную систему водоотведения, что существенно упрощает его утилизацию по сравнению с регенерационными растворами ионообменных установок, для которых проблема утилизации зачастую остается серьезным эксплуатационным ограничением. Благодаря этому минимизируется риск дополнительной нагрузки на очистные сооружения и снижается вероятность нанесения ущерба окружающей среде.

Таким образом, если обобщить все вышесказанное и сопоставить ключевые характеристики двух рассмотренных технологий применительно к условиям эксплуатации котельных, обслуживающих жилые комплексы, становится очевидным, что именно обратноосмотический метод водоподготовки в наибольшей степени соответствует тем высоким требованиям, которые предъявляются к современным системам теплоснабжения жилой застройки. Обеспечивая глубокое обессоливание воды, осмос создает условия для максимально эффективного сжигания топлива за счет минимизации продувки, что напрямую влияет на энергоэффективность котельной. Отсутствие химических реагентов и агрессивных солевых стоков делает осмотические установки экологически безопасными, что особенно важно при их эксплуатации в непосредственной близости от жилых домов. Наконец, высокое качество получаемой воды положительно сказывается на состоянии всей системы горячего водоснабжения, продлевая срок службы трубопроводов и сантехнического оборудования в квартирах. Учитывая все эти факторы, а также наблюдающиеся в последние годы тенденции к ужесточению экологических норм и росту цен на энергоносители, можно сделать предположение, что применение обратного осмоса в котельных жилых комплексов будет неуклонно расширяться, и данная технология имеет все основания стать новым стандартом для современных и реконструируемых жилых комплексов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камышева, Е. Е. Современные проблемы теплоснабжения загородного дома / Е. Е. Камышева, В. В. Портнов // Физико-технические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения : труды 22-й научно-технической конференции, Воронеж, 30 октября 2020 года. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2020. – С. 21-26.
2. Котляр М. Н. Водоподготовка и водно-химические режимы на теплоэнергетических объектах : учеб. пособие / М. Н. Котляр, Л. А. Николаева. – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2019. – 184 с.

3. Кандрушин, А. А. Совершенствование технологии водоподготовки на тепловых электростанциях / А. А. Кандрушин, Л. Ф. Комарова, В. А. Сомин // Ползуновский вестник. – 2024. – № 1. – С. 186-190.
4. Селиванов, О. Г. Оценка эффективности противоточных схем работы натрий-катионитовых фильтров в процессах умягчения воды / О. Г. Селиванов, Е. С. Пикалов, Л. Н. Романова // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 7(91). – С. 318-330.
5. Абрамчук, Т. В. Эксплуатация котельных установок : учеб. пособие / Т. В. Абрамчук; ГОУ УЦ «Профессионал». – Москва : Профессионал, 2016. – 230 с.
6. Славская, И. Л. Современное мембранное фильтрование воды / И. Л. Славская, С. Ю. Макаров, Е. В. Ильина // Пиво и напитки. – 2009. – № 6. – С. 46-49.
7. Коханенко, Д. С. Исследование потенциала повышения эффективности работы котельных при использовании современных методов водоподготовки / Д. С. Коханенко // Шаг в науку. – 2018. – № 3. – С. 63-65.
8. Первов, А. Г. Разделение высокоминерализованных стоков установок ионного обмена с применением наночистотных мембран / А. Г. Первов, Д. В. Спицов // Системные технологии. – 2021. – № 2(39). – С. 34-54.

#### REFERENCES

1. Kamysheva, E. E. Modern Problems of Heating a Country House / E. E. Kamysheva, V. V. Portnov // Physical and Technical Problems of Energy, Ecology, and Energy Conservation: Proceedings of the 22nd Scientific and Technical Conference, Voronezh, October 30, 2020. – Voronezh : Voronezh State Technical University, 2020. – P. 21-26.
2. Kotlyar, M. N. Water treatment and water-chemical regimes at heat power facilities : Textbook / M. N. Kotlyar, L. A. Nikolaeva. – Kazan : Kazan State Power Engineering University, 2019. – 184 p.
3. Kandrushin, A. A. Improvement of water treatment technology in thermal power plants / A. A. Kandrushin, L. F. Komarova, V. A. Somin // Polzunovsky Bulletin. – 2024. – No. 1. – P. 186-190.
4. Selivanov, O. G. Evaluation of the effectiveness of countercurrent schemes of sodium-cationite filters in water softening processes / O. G. Selivanov, E. S. Pikalov, L. N. Romanova // Engineering Bulletin of the Don. – 2022. – No. 7(91). – P. 318-330.
5. Abramchuk, T. V. Operation of boiler plants : Textbook / T. V. Abramchuk; SEI TC «Professional». – Moscow : Professional, 2016. – 230 p.
6. Slavskaja, I. L. Modern membranous water filtering / I. L. Slavskaja, S. Yu. Makarov, E. V. Ilyina // Beer and Beverages. – 2009. – No. 6. – P. 46-49.
7. Kokhanenko, D. S. Study of the potential for increasing the efficiency of boiler houses using modern water treatment methods / D. S. Kokhanenko // Step into Science. – 2018. – No. 3. – P. 63-65.
8. Pervov, A.G. Separation of highly mineralized wastes from ion exchange plants using nanofiltration membranes / A. G. Pervov, D. V. Spitsov // System Technologies. – 2021. – No. 2(39). – P. 34-54.

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ПАРАДИГМУ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF TECHNOSPHERE SAFETY INTEGRATION INTO THE  
DEVELOPMENT PARADIGM OF THE THERMAL ENERGY COMPLEX

**Соловьева В.Д.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Solovyova V.D.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Черных Д.А.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Chernykh D.A.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Внукова С.В.**, кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Vnukova S.V.**, PhD in Physics and Mathematics, Acting Head of the Electrical Engineering, Thermal Engineering and Hydraulics Department, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Дружинина Е.В.**, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Druzhinina E.V.**, Senior lecturer, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье исследуется диалектическая взаимосвязь между технологическим развитием теплоэнергетики и состоянием техносферной безопасности. Обосновывается тезис о переходе от линейной модели «причинение ущерба-компенсация» к модели превентивного управления рисками. Проведен системный анализ современных угроз (экологических, техногенных, антропогенных), генерируемых объектами теплоэнергетики. Представлена расчетная часть, включающая количественную оценку интегрального риска аварии на мазутном хозяйстве ТЭЦ и экономическую оценку ущерба от выбросов загрязняющих веществ.

**Ключевые слова:** теплоэнергетика, техносферная безопасность, риск-ориентированный подход, количественная оценка риска, экономический ущерб, декарбонизация, устойчивое развитие.

**Abstract.** The article explores the dialectical relationship between the technological development of thermal power engineering and the state of technosphere safety. It substantiates the thesis about the transition from the linear model of «causing damage-compensation» to the model of

preventive risk management. A systematic analysis of modern threats (environmental, technogenic, and anthropogenic) generated by thermal power engineering facilities is conducted. A calculation section is presented, including a quantitative assessment of the integrated risk of an accident at a thermal power plant's fuel oil facility and an economic assessment of the damage caused by pollutant emissions.

**Keywords:** thermal power engineering, technosphere safety, risk-oriented approach, risk quantification, economic damage, decarbonization, sustainable development.

В структуре современной мировой энергетики теплоэнергетика продолжает занимать доминирующее положение, обеспечивая стабильность базовой генерации и покрытие пиковых нагрузок. Вместе с тем высокая концентрация мощностей, использование ископаемых видов топлива и значительная протяженность тепловых сетей делают эту отрасль одним из основных источников антропогенного воздействия на окружающую среду и потенциальным генератором техногенных аварий [1, 2]. Долгое время вопросы наращивания генерации и обеспечения безопасности рассматривались как разнонаправленные векторы: увеличение мощности неизбежно влекло за собой рост нагрузки на среду.

Актуальность работы определяется существенными изменениями нормативно-правовой базы и общественных ожиданий. Введение механизмов углеродного регулирования, ужесточение требований к качеству атмосферного воздуха, а также высокий уровень аварийности на объектах ЖКХ и энергетики требуют пересмотра устоявшихся подходов [3, 4]. Целью данной работы является формирование концептуального взгляда на техносферную безопасность не как на ограничитель, а как на внутренний драйвер технологической модернизации теплоэнергетического комплекса, подкрепленное количественными оценками рисков и ущербов.

Категория «техносферная безопасность» применительно к теплоэнергетике носит интегративный характер. Она включает в себя не только охрану труда (ОТ) и технику безопасности (ТБ), но и более широкие аспекты: промышленную безопасность (защиту от аварий на опасных производственных объектах (ОПО)), экологическую безопасность (защиту среды обитания) и энергетическую безопасность (бесперебойность снабжения). В условиях четвертого энергоперехода к этому перечню добавляется фактор климатической безопасности, связанный с эмиссией парниковых газов [2, 4].

Анализ современного состояния отрасли позволяет выделить три основных блока проблем, требующих внимания [3, 5, 6].

1. Физический и моральный износ. По данным отраслевой статистики, износ генерирующего оборудования в ряде регионов превышает 60-65 %. Износ тепловых сетей в системах централизованного теплоснабжения составляет в среднем 70 %, что приводит к потерям теплоносителя (до 20-30 % транспортируемой тепловой энергии) и росту числа аварийных отключений [3]. Авария на теплотрассе в зимний период из технологического инцидента мгновенно перерастает в чрезвычайную ситуацию (ЧС) социального характера, что напрямую относится к сфере техносферной безопасности.

2. Трансформация экологического законодательства. Принятие Федерального закона «О проведении эксперимента по квотированию выбросов...» и поэтапное внедрение

наилучших доступных технологий (НДТ) обязывают предприятия переходить на системы очистки, соответствующие уровню мировой практики [4]. Минприроды регулярно обновляет перечень методик расчета выбросов, включая специализированные методики для газотурбинных и парогазовых установок. Теплоэнергетика сталкивается с необходимостью единовременных масштабных инвестиций в газоочистку (электрофилтры, SCR/SNCR-технологии), что для многих станций является критической финансовой нагрузкой.

3. Проблема накопленного экологического ущерба. Золошлакоотвалы ТЭС занимают тысячи гектаров земель. Пыление золоотвалов является источником мелкодисперсной пыли (PM2.5 и PM10), оказывающей прямое негативное воздействие на здоровье населения [2]. С позиций техносферной безопасности необходима реализация проектов по рекультивации и переработке золошлаковых отходов (ЗШО) в строительные материалы, что позволит ликвидировать источник опасности и высвободить земли.

Традиционный нормативный подход (тотальное соблюдение предписанных правил) доказал свою недостаточную эффективность. На смену ему приходит риск-ориентированный подход (РОП). В контексте теплоэнергетики РОП предполагает выявление объектов и участков с максимальной потенциальной опасностью и концентрацию ресурсов именно на них [3, 6].

Для ТЭС и котельных основными зонами риска являются:

- газовое хозяйство (риск взрыва, утечки);
- поверхности нагрева котлов, работающие под высоким давлением (риск гидроудара, разрушения);
- системы топливоподачи (угольная пыль – риск взрыва и профзаболеваний);
- хвостовые поверхности (сернокислотная коррозия, выбросы);
- мазутное хозяйство (риск пролива, пожара, гидродинамической волны).

Математическая оценка риска  $R$  может быть выражена формулой:  $R = PU$ , где  $P$  – вероятность события;  $U$  – ущерб. Задача современного инженера-теплоэнергетика – стремиться к сведению обоих параметров к минимуму через внедрение систем ранней диагностики (акустическая эмиссия, тепловизионный контроль) и автоматических систем защиты [1, 5].

Анализ современных тенденций показывает, что наиболее эффективное снижение техносферных рисков достигается не изоляцией персонала от вредных факторов (средства индивидуальной защиты (СИЗ), а кардинальным изменением технологии [4].

Переход на парогазовые установки приводит к повышению КПД с 35-38 % до 50-55 %. Это означает, что на выработку того же количества энергии тратится значительно меньше топлива. Прямое следствие – пропорциональное снижение всех видов выбросов, включая CO<sub>2</sub>, и уменьшение теплового загрязнения водоемов.

Технология сжигания в кипящем слое позволяет сжигать низкосортные угли и даже отходы углеобогащения с высоким КПД и низким образованием оксидов азота, а также связывать серу непосредственно в топке (за счет добавки известняка), что исключает необходимость в сложных сероочистках.

Снижение влияния человеческого фактора – важнейший резерв безопасности. Внедрение автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП),

исключающее персонал из зоны высоких температур и давлений, а также использование цифровых двойников для обучения операторов действиям в нештатных ситуациях кратно снижает вероятность аварий [6].

Для обоснования экономической эффективности мероприятий по обеспечению техноферной безопасности необходима количественная оценка потенциальных ущербов. Рассмотрим два основных аспекта: риск аварии на мазутном хозяйстве ТЭЦ и экономический ущерб от выбросов загрязняющих веществ.

Мазутное хозяйство ТЭЦ относится к категории взрывопожароопасных объектов. В резервуарах хранится мазут при температуре 65-80 °С, что создает угрозу гидродинамической волны прорыва, пожара разлива и теплового излучения при аварии.

Для расчета интегрального риска используем формулу математического ожидания ущерба:

$$R(Y_{\Sigma}) = R(Y_C) + R(Y_M) + R(Y_{\text{Э}}), \quad (1)$$

где  $R(Y_{\Sigma})$  – интегральный риск (руб/год);  $R(Y_C)$  – риск социального ущерба (гибель персонала и населения);  $R(Y_M)$  – риск материального ущерба (разрушение оборудования, зданий);  $R(Y_{\text{Э}})$  – риск экологического ущерба (загрязнение почв и водоемов).

Рассмотрим условный пример для ТЭЦ мощностью 400 МВт с мазутным хозяйством, включающим 3 резервуара объемом по 10000 м<sup>3</sup> каждый. Исходные данные для расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета интегрального риска

Параметр	Значение	Обозначение
Вероятность крупной аварии на мазутном хозяйстве в год	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$P_1$
Вероятность локальной аварии (разгерметизация трубопровода)	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$P_2$
Количество персонала в зоне поражения	25 чел.	$N_{\text{П}}$
Количество населения в селитебной зоне (до 500 м)	1200 чел.	$N_{\text{Н}}$
Стоимость оборудования мазутного хозяйства	350 млн. руб.	$C_{\text{об}}$
Стоимость зданий и сооружений в зоне поражения	120 млн. руб.	$C_{\text{зд}}$
Объем мазута в резервуарах (средний)	20000 м <sup>3</sup>	$V_{\text{М}}$
Стоимость утилизации 1 м <sup>3</sup> загрязненного грунта	15 тыс. руб.	$C_{\text{Г}}$

Для крупной аварии (сценарий 1: разрушение резервуара с пожаром) расчет ущербов:

Социальный ущерб при гибели 3 человек (по статистике):  $3 \cdot 5,2 = 15,6$  млн. руб. (при стоимости жизни по методике 5,2 млн. руб.).

Материальный ущерб: разрушение 1 резервуара (80 млн. руб.) + повреждение соседнего оборудования (35 млн. руб.) = 115 млн. руб.

Экологический ущерб: разлив 5000 т мазута, площадь загрязнения 2 га, стоимость рекультивации 45 млн. руб.

Интегральный риск для сценария 1:  $R_1 = P_1 \cdot (15,6 + 115 + 45) \cdot 10^6 = 26340$  руб./год.

Для локальной аварии (сценарий 2: разгерметизация трубопровода):

Социальный ущерб: травмы 1 человека (500 тыс. руб.).

Материальный ущерб: ремонт трубопровода (3 млн. руб.).

Экологический ущерб: разлив 100 т мазута, локальное загрязнение (5 млн. руб.).

Интегральный риск для сценария 2:  $R_2 = P_2 \cdot (0,5 + 3 + 5) \cdot 10^6 = 17000$  руб./год.

Суммарный интегральный риск:  $R_{\Sigma} = R_1 + R_2 = 43340$  руб./год.

Полученная величина (43340 руб./год) представляет собой математическое ожидание годового ущерба от аварий на мазутном хозяйстве. Если затраты на модернизацию (установка систем автоматического пожаротушения, усиление обваловки) составляют, например, 2,5 млн. руб. и снижают вероятность крупной аварии на 70 %, то срок окупаемости инвестиций

составит:  $T_{ок} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{0,7 \cdot 26340} \approx 135$  лет.

На первый взгляд, результат говорит об экономической неэффективности инвестиций при малых вероятностях событий. Однако такая оценка требует корректировки. В расчетах необходимо дополнительно учитывать репутационные потери, штрафы за превышение лимитов и социальную напряженность. С учетом этих факторов реальный ущерб может возрасти в 5-10 раз.

Для оценки экологического ущерба от выбросов ТЭЦ используем методику, основанную на приведенной массе загрязняющих веществ.

Экономическая оценка годового ущерба от выбросов в атмосферу проводится по формуле:

$$U_B = \gamma \cdot \sigma \cdot f \cdot M, \quad (2)$$

где  $\gamma = 3,3$  руб./ТУВ – константа (базовый норматив);  $\sigma$  – показатель относительной опасности загрязнения атмосферы (для территорий с высокой плотностью населения принимается равным 3);  $f$  – безразмерная константа, зависящая от высоты источника (для труб высотой 100-150 м принимается 0,5);  $M$  – приведенная масса годового выброса загрязнений (ТУВ/год).

Рассмотрим условную ТЭЦ мощностью 400 МВт, работающую на угле. Исходные данные по выбросам представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет приведенной массы выбросов загрязняющих веществ

Загрязняющее вещество	Годовой выброс, т/год	Коэффициент относительной опасности, ТУВ/т	Приведенная масса, ТУВ/год
Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )	8500	20	170000
Оксиды азота (NO <sub>x</sub> )	3200	25	80000
Твердые частицы (зола)	1800	70	126000
Оксид углерода (CO)	650	1	650
Пятиокись ванадия (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,8	2275	1820
Итого			378470

Подставляем значения в формулу (2):  $U_B = 3,3 \cdot 3 \cdot 0,5 \cdot 378470 = 1873426,5$  руб./год.

Для сравнения, в практике Росприроднадзора подобные оценки могут достигать значительных величин. Например, по данным проверки на ТЭЦ в Байкальске, экологический ущерб атмосферному воздуху от превышения выбросов диоксида серы был оценен в

102,35 млн. руб., что подтверждает реалистичность применяемых методик при выявлении нарушений.

Согласно полученным данным интегральный риск аварий (43,34 тыс. руб./год) значительно ниже экономического ущерба от текущих выбросов (1,87 млн. руб/год). Это не означает, что аварийные риски менее важны. При их реализации возможны человеческие жертвы и катастрофические последствия, не полностью учитываемые стоимостными показателями.

Экологический ущерб от выбросов является постоянным, ежегодно воспроизводимым фактором. Его снижение даже на 20 % (путем установки электрофильтров или перехода на лучшее топливо) дает ежегодный экономический эффект около 374 тыс. руб., что при стоимости природоохранного оборудования (10-50 млн. руб.) дает срок окупаемости 27-134 года, что также требует государственной поддержки.

Для объективной оценки эффективности инвестиций в безопасность необходимо использовать методы нечеткой логики и многокритериального анализа, учитывающие не только прямые экономические потери, но и социальные факторы, репутационные риски, экологические ограничения [3].

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о наличии устойчивой корреляции между уровнем технологического развития теплоэнергетического предприятия и состоянием техносферной безопасности. Предприятия, внедряющие НДТ и цифровые системы мониторинга, демонстрируют устойчивое снижение как количества несчастных случаев, так и объема удельных выбросов (кг/Гкал).

Количественные расчеты показывают, что прямой экономический эффект от мероприятий по снижению аварийности и выбросов часто имеет длительный срок окупаемости (десятки лет). Это объясняется крайне низкой вероятностью крупных аварий, заниженными нормативами стоимости жизни и экологического ущерба в действующих методиках, а также отсутствием полного учета косвенных потерь (простой производства, упущенная выгода, ухудшение здоровья населения).

Сложившееся положение требует совершенствования механизмов «зеленого финансирования», ускоренной амортизации природоохранного оборудования и внедрения риск-ориентированных тарифов на тепловую энергию, учитывающих инвестиционную составляющую на безопасность.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Интеграция требований техносферной безопасности в жизненный цикл энергообъекта (от проектирования до вывода из эксплуатации) является безальтернативным условием его функционирования.

2. Главным инструментом снижения техногенного воздействия является переход на НДТ, обеспечивающий сочетание экономической эффективности и экологической результативности.

3. Количественные оценки рисков и ущербов (расчетная часть) показывают необходимость совершенствования методик экономической оценки для адекватного учета социальных и экологических факторов.

4. Проблема кадрового обеспечения требует пересмотра образовательных стандартов в сторону усиления компетенций в области риск-анализа и цифровых технологий контроля безопасности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов, П. Г. Техногенные системы и экологический риск: учебник и практикум для вузов / П. Г. Белов, К. В. Чернов ; под общей редакцией П. Г. Белова. – Москва : Издательство Юрайт, 2026. – 405 с.

2. Костенко, Т. А. Экологические проблемы теплоэнергетики / Т. А. Костенко, Е. В. Самаркина // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 133-136.

3. Козлитин, П. А. Методы нечеткого анализа риска аварий в системах теплоснабжения / П. А. Козлитин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 1, № 1(44). – С. 175-183.

4. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. – Москва : Бюро НДТ, 2017. – 271 с.

5. Оценка надежности и технических рисков при эксплуатации теплотехнических агрегатов / Н. М. Арипова, А. С. Никифоров, А. М. Парамонов [и др.]. // Новые огнеупоры. – 2023. – № 4. – С. 44-53.

6. Гуменюк, В. И. Разработка математической модели и методики оценки риска ЧС на потенциально опасном объекте энергетики с их программной реализацией / В. И. Гуменюк, А. Ю. Туманов // Технологии гражданской безопасности. – 2017. – Т. 14, № 1(51). – С. 66-74.

### REFERENCES

1. Belov, P. G. Technogenic systems and environmental risk: Textbook and Workshop for Universities / P. G. Belov, K. V. Chernov ; edited by P. G. Belov. – Moscow : Yurayt Publishing House, 2026. – 405 p.

2. Kostenko, T. A. Ecological problems of heat and energy / T. A. Kostenko, E. V. Samarkina // Youth Bulletin of Irkutsk State Technical University. – 2019. – Vol. 9, No. 1. – P. 133-136.

3. Kozlitin, P. A. Fuzzy accidents risk analysis methods within heat supply systems / P. A. Kozlitin // Bulletin of the Saratov State Technical University. – 2010. – Vol. 1, No. 1(44). – P. 175-183.

4. Information and technical reference book on the best available technologies ITB 38-2017. Combustion of fuel in large installations for the purpose of energy production. – Moscow : NDT Bureau, 2017. – 271 p.

5. Assessment of reliability and technical risks in the operation of heat engineering units / N. M. Aripova, A. S. Nikiforov, A. M. Paramonov [et al.]. // New refractories. – 2023. – No. 4. – P. 44-53.

6. Gumenyuk, V. I. Development of Mathematical Models and Emergency Risk Assessment Method on Potentially Dangerous Energy Objects with their Program Implementation / V. I. Gumenyuk, A. Yu. Toumanov // Civil Security Technology. – 2017. – Vol. 14, No. 1(51). – P. 66-74.

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ  
«ЗЕЛЕННЫХ» КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ  
ШЛАКОВ КАК ФАКТОР ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРОИЗВОДСТВА**

**ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO THE CREATION OF «GREEN» COMPOSITES  
BASED ON METALLURGICAL SLAGS AS A FACTOR OF PRODUCTION ENERGY  
EFFICIENCY**

**Стородубцева Т.Н.**, доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Storodubtseva T.N.**, DrSc in Technical Sciences, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Жабин Д.А.**, аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Zhabin D.A.**, Postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Жигунова Д.Э.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Zhigunova D.E.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** Статья посвящена анализу современных подходов к созданию полимерных композиционных материалов с использованием металлургических шлаков как вторичного сырья. Рассматривается эволюция отношения к техногенным отходам: от экологической угрозы до ценного ресурса для «зеленой» экономики. На основе анализа научных исследований выявлены закономерности влияния химического и фракционного состава шлаков (доменных, конвертерных, электросталеплавильных) на физико-механические свойства композитов. Показано, что включение шлаков в полимерные матрицы позволяет не только утилизировать миллионы тонн отходов, но и снижать энергозатраты на производство материалов за счет замены первичного сырья и уменьшения расходов на хранение отходов. Стратегическим решением предлагается переход к принципам промышленного симбиоза, где отходы металлургии становятся сырьем для производства энергоэффективных строительных и технических материалов. Делается вывод о необходимости объединения научных разработок, промышленного потенциала и государственной поддержки для формирования малоотходных производственных циклов.

**Ключевые слова:** металлургические шлаки, полимерные композиты, энергоэффективность, утилизация отходов, ресурсосбережение, циркулярная экономика, «зеленые» материалы.

**Abstract.** The article analyzes modern approaches to the creation of polymer composite materials using metallurgical slags as secondary raw materials. The evolution of attitudes towards technogenic waste is considered: from an environmental threat to a valuable resource for the «green» economy. Based on the analysis of scientific research, the patterns of the influence of the chemical and fractional composition of slags (blast furnace, converter, electric arc furnace) on the physical and mechanical properties of composites are revealed. It is shown that the incorporation of slags into polymer matrices allows not only to dispose of millions of tons of waste, but also to reduce energy consumption for material production by replacing primary raw materials and reducing waste storage costs. The strategic solution proposed is the transition to the principles of industrial symbiosis, where metallurgical waste becomes a raw material for the production of energy-efficient construction and technical materials. The conclusion emphasizes the need to combine scientific research, industrial potential, and state support to form low-waste production cycles.

**Keywords:** metallurgical slags, polymer composites, energy efficiency, waste recycling, resource conservation, circular economy, «green» materials.

Урал традиционно считается историческим центром российской металлургии, но многолетняя промышленная активность породила серьезную проблему накопление огромных объемов техногенных отходов. Эксперты отмечают, что около 25 % территории региона сегодня находятся в кризисном экологическом состоянии из-за загрязнений, вызванных складированием производственных отходов [1]. Главные «поставщики» таких отходов горнодобывающие и металлургические предприятия, а также теплоэнергетические объекты. Суммарный объем накопленных отходов исчисляется миллиардами тонн. Для их хранения приходится выделять большие площади земли и строить дорогостоящие хранилища, что наносит дополнительный урон окружающей среде. Парадокс ситуации в том, что шлаки, десятилетиями воспринимавшиеся лишь как экологическая угроза, на самом деле обладают свойствами, позволяющими рассматривать их как ценное техногенное сырье.

По своей структуре металлургические шлаки, такие как доменные, сталеплавильные и конвертерные представляют собой сложные оксидные системы. Согласно данным рентгеноспектрального анализа, доменный шлак преимущественно состоит из оксида кальция ( $\text{CaO}$  – до 38 %), кремния ( $\text{SiO}_2$  – около 36 %) и алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 13 %), что делает его по составу близким к природным минеральным наполнителям. Важной особенностью является присутствие в шлаках оксидов железа, магния, марганца и ряда других элементов, способных придавать композитам специфические свойства (например, ферромагнитные). Ключевое различие между разными типами отходов заключается в их дисперсности: зола уноса тепловых электростанций на 90 % состоит из частиц размером менее 0,25 мкм, тогда как доменный шлак для достижения однородности требует дополнительного измельчения [1, 2].

Исторически шлаки применялись главным образом в дорожном строительстве и при производстве цемента. Вовлечение же их в полимерные композиты относительно новое направление, получившее развитие в последние десятилетия.

Если в развитых странах уровень утилизации отходов теплоэнергетики достигает 50-90 %, то в России этот показатель долгое время не превышал 4-5 %. В настоящее время ситуация меняется: разрабатываются технологии производства композитов для строительной,

рекламной и упаковочной отраслей, а также специальных материалов магнитоуправляемых герметиков, термоинтерфейсных материалов, наполнителей для резиновых смесей [3].

Производство первичных наполнителей (мела, талька, технического углерода) требует значительных энергозатрат на добычу, дробление, обогащение и транспортировку. Metallургические шлаки, будучи уже извлеченными на поверхность и частично переработанными, представляют собой материал с уже затраченной энергией (так называемый «воплощенный углерод»). Применение подобных материалов дает возможность сократить потребление энергоресурсов на всем производственном цикле начиная с этапа добычи сырья и заканчивая утилизацией отходов.

В данном контексте «зеленые» композиты оказываются не просто экологически безопасной заменой традиционным материалам, а реальным средством достижения энергоэффективности. Что касается использования metallургических шлаков в качестве наполнителей, анализ научных работ показывает: определяющую роль для их успешного внедрения в композиты играют химический состав и распределение частиц по размерам. Исследования доменных шлаков Магнитогорского metallургического комбината, проведенные О.В. Ершовой и Л.Г. Колядой, зафиксировали в их составе до 38 % оксида кальция и около 36 % диоксида кремния. Это обеспечивает высокую степень совместимости с полярными полимерами, в частности с поливинилхлоридом. При этом шлаковый материал нуждается в разделении на фракции: в исходной массе присутствуют частицы размером от 0,25 до 5 мм и крупнее, в то время как для получения качественных композиционных материалов требуется фракция менее 0,25 мм либо применение методов, обеспечивающих однородность смеси [1].

Значимым достижением последних лет стало подтверждение возможности использования не только доменных, но и конвертерных шлаков, а также шлаков электродуговых печей. В работах А. Gobetti с соавторами показано, что шлаки электродуговой плавки могут эффективно вводиться в термопластичные (полипропилен), термореактивные (эпоксидные смолы) и эластомерные (бутадиен-нитрильный каучук) полимерные матрицы [4]. Введение такого наполнителя способствует повышению твердости и модуля упругости композитов, хотя и сопровождается некоторым снижением ударной вязкости. Еще более неожиданные результаты были получены при исследовании сталеплавильных шлаков как наполнителей для термоинтерфейсных материалов: выяснилось, что оксид кальция, который прежде рассматривался как фактор, затрудняющий использование шлаков в бетонных смесях, улучшает теплопроводящие свойства композитов [5, 6].

Разработка эффективных материалов для отвода тепла в электронных устройствах становится действительной благодаря современным технологиям для получения композитов, которые включают последовательные этапы: сбор и разделение отходов, их измельчение до нужной фракции, смешивание с полимерным связующим и последующее формование изделий.

Часто в качестве полимерной матрицы используют вторичные полимеры, например, ПВХ, получаемый при демонтаже оконных профилей [7]. При таком подходе перерабатываются минеральные и полимерные отходы. Вспененные композиты представляют особый интерес, в их производстве применяют порофоры, в частности ЧХЗ-21 (диамид

азодикарбоновой кислоты). Комбинация вспенивателя со шлаком помогает улучшить его теплоизоляционные и звукоизоляционные свойства, снизить плотность материала, а также сократить его себестоимость. Современные исследования направлены на преодоление проблемы себестоимости компонентов, поскольку шлаки обладают гидрофильными свойствами, а большинство полимеров обладают гидрофобными свойствами, требуется модифицировать поверхность наполнителя. По результатам экспериментов установлено, что введение шлаков в полимерные материалы повышает их твердость и модуль упругости на 30-50 %, причем величина прироста зависит от степени наполнения. Кроме того, отмечается рост термостойкости материала, шлаки сохраняют стабильность при температурах вплоть до 600 °С [8]. Важно соблюдать баланс: при превышении оптимальной концентрации наполнителя, которая обычно составляет 10-30 мас.%, прочность материала снижается из-за нарушения целостности полимерной матрицы.

При оценке энергоэффективности производства «зеленых» композитов нужно учитывать несколько аспектов. Во-первых, снижается экологическая нагрузка: уменьшаются площади полигонов для захоронения отходов и сокращаются выбросы при добыче первичного сырья. Во-вторых, достигается прямая экономия энергии, производство наполнителя из отходов требует в 3-5 раз меньше энергозатрат, чем изготовление первичного минерального порошка. В-третьих, использование локальных отходов позволяет сократить транспортные расстояния и связанные с ними выбросы углекислого газа.

Хороший пример, замещение технического углерода в резинах. Производство сажи крайне энергоемкий процесс, который основан на неполном сгорании нефтяных масел. Если заменить 10 phr (частей на сто частей каучука) технического углерода шлаком, можно сохранить прочностные характеристики материала и одновременно снизить гистерезисные потери на 30 %. Шины и резинотехнические изделия с таким наполнителем нагреваются меньше при циклических нагрузках, благодаря чему энергоэффективность готовой продукции повышается напрямую. Широкому внедрению подобных технологий препятствуют несколько факторов: отсутствие систематизированной классификации шлаков в качестве сырья для полимерных композитов, нехватка нормативной базы, которая регламентировала бы состав и свойства подобных материалов, а также отсутствие современных производственных мощностей для глубокой переработки отходов, в том числе для тонкого измельчения, классификации и модификации поверхности.

Экологическая безопасность имеет ключевое значение. Шлаки могут содержать тяжелые металлы способные к выщелачиванию. При этом исследования подтверждают, что включение шлака в полимерную матрицу заметно снижает миграцию таких элементов, хотя постоянный мониторинг и разработка методов пассивации потенциально опасных компонентов по-прежнему необходимы. Положительный пример концепция территориально-промышленных кластеров: в них отходы металлургии превращаются в ресурс для стройиндустрии и производства полимерных изделий, что воплощает принципы циркулярной экономики и промышленного симбиоза, когда побочные продукты одного производства становятся сырьем для другого. Современные исследования смещают акцент с подхода «утилизация ради утилизации» в сторону создания функциональных материалов с заданными характеристиками: металлургические шлаки все чаще воспринимают не как дешевый балласт,

а как активный компонент, способный наделять композиты уникальными свойствами. К примеру, созданы магнитоуправляемые герметизирующие композиты на основе конвертерных шлаков с ферромагнитной фазой они подходят для герметизации трещин в железобетонных конструкциях под действием магнитного поля. Еще одно перспективное направление разработка термоинтерфейсных материалов с высокой теплопроводностью (до 3,64 Вт/м·К) и одновременно высоким электрическим сопротивлением: такие решения оптимальны для отвода тепла в мощных электронных устройствах и изготавливаются из ранее считавшихся непригодными для переработки отходов. Согласно обзорным работам последних лет, армирование полимеров наполнителями из промышленных отходов один из самых перспективных путей создания устойчивых материалов, соответствующих принципам «зеленой» химии и циркулярной экономики [4]. Подобные материалы уже применяют в экранировании электромагнитного излучения, очистке сточных вод, производстве строительных панелей, автомобильных компонентов и даже лопастей ветрогенераторов [9].

Анализ современных подходов к созданию «зеленых» композитов на основе металлургических шлаков дает ряд важных выводов. Доменные, конвертерные и электросталеплавильные шлаки ценное техногенное сырье для полимерных композиционных материалов. Их химический состав с преобладанием оксидов кальция, кремния и алюминия, а также такие физические свойства, как термостабильность, твердость и наличие ферромагнитных фаз, позволяют не просто заменять традиционные минеральные наполнители, но и наделять материалы новыми функциональными характеристиками. За последние годы технологии переработки шлаков в композиты вышли за рамки лабораторных экспериментов и успешно внедряются в промышленность: оптимизированы составы смесей и режимы переработки, разработаны методы модификации поверхности, повышающие совместимость с полимерными матрицами. Экспериментально подтверждено, что наилучший результат достигается при содержании шлака в композитах на уровне 10-30 мас. %, которое варьируется в зависимости от типа матрицы и заданных свойств материала. Важнейший вклад этой технологии в решение задач энергоэффективности и энергосбережения состоит в сокращении совокупных энергозатрат благодаря переходу от линейной модели «добыча-использование-захоронение» к циркулярной схеме «отходы-сырье-продукция». Замещение первичных наполнителей вторичными сокращает энергоемкость производства на 20-50 %, уменьшает выбросы парниковых газов и предотвращает загрязнение окружающей среды. Опыт последних лет показывает, что системный подход к проблеме, опирающийся на научные исследования, промышленную кооперацию и государственную поддержку, способен превратить накопленные отходы в источник экономического роста и экологического благополучия. Необходимо создание нормативной базы, развитие сети перерабатывающих производств и подготовка специалистов в области техногенного сырья. Современный кризис в обращении с отходами металлургии – это результат многолетнего накопления экологических проблем. Но он же открывает окно возможностей для внедрения прорывных технологий. Научная база сформирована, промышленный потенциал существует, общественный запрос на экологизацию производства звучит все громче. Остается объединить эти факторы политической волей и экономическими стимулами, чтобы запустить масштабный процесс трансформации отходов в ресурсы во имя энергоэффективности и устойчивого развития.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ершова, О. В. Исследование возможности совместной переработки техногенных минеральных и полимерных отходов / О. В. Ершова, Л. Г. Коляда // Теория и технология металлургического производства. – 2013. – № 1(13). – С. 71-73.
2. Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе отходов производства с различными рецептурами / А. Е. Бурдонов, В. В. Барахтенко, Е. В. Зелинская [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 9(35). – С. 14-22.
3. Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites / O. Das, K. Babu, V. Shanmugam [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 158. – Art. 112054.
4. Gobetti, A. Innovative Reuse of Electric Arc Furnace Slag as Filler for Different Polymer Matrixes / A. Gobetti, G. Cornacchia, G. Ramorino // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – Art. 832.
5. Ning, S. Research on the Interface Mechanism and Properties of Silicon-Hybrid Acrylic Resin-Modified Steel Slag as a Functional Filler for Natural Rubber / S. Ning, Z. Wu, Z. Yong // Polymer Engineering and Science. – 2025. – Vol. 66, No. 2. – P. 1229-1241.
6. Recycling Bottom Ash and Steel Slag Containing CaO into Electrically Insulating and Heat-Dissipating Thermal Interface Materials / J. H. Kang, M.G. Kang, J.J. Hong [et al.] // Advanced Energy and Sustainability Research. – 2025. – No. 6. – Art. 2400291.
7. Гончарова, М. А. Структурообразование и технологии композитов общего и специального назначения на основе малоиспользуемых отходов металлургии / М. А. Гончарова, Е. М. Чернышов. – Воронеж : ВГТУ, 2022. – 156 с.
8. Jaber, A. Sustainable Polymer Composites from Industrial Wastes / A. Jaber, E. N. Dresvyanina // Reviews on Advanced Materials and Technologies. – 2025. – Vol. 7, No. 1. – P. 24-52.
9. Valorization of steel slag in clay: Thermophysical study and energy simulation in Oujda (Morocco) / M. Kaddouhi, M. Drissi, O. Horma [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2025. – Vol. 680. – Art. 00103.

## REFERENCES

1. Ershova, O. V. Research of the possibility of joint processing of technogenic mineral and polymer waste / O. V. Ershova, L. G. Kolyada // Theory and technology of metallurgical production. – 2013. – No. 1(13). – P. 71-73.
2. Physical and mechanical characteristics of composite materials based on production waste with different formulations / A. E. Burdonov, V. V. Barakhtenko, E. V. Zelinskaya [et al.] // Engineering and Construction Journal. – 2012. – No. 9(35). – P. 14-22.
3. Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites / O. Das, K. Babu, V. Shanmugam [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 158. – Art. 112054.
4. Gobetti, A. Innovative Reuse of Electric Arc Furnace Slag as Filler for Different Polymer Matrixes / A. Gobetti, G. Cornacchia, G. Ramorino // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – Art. 832.

5. Ning, S. Research on the Interface Mechanism and Properties of Silicon-Hybrid Acrylic Resin-Modified Steel Slag as a Functional Filler for Natural Rubber / S. Ning, Z. Wu, Z. Yong // Polymer Engineering and Science. – 2025. – Vol. 66, No. 2. – P. 1229-1241.
6. Recycling Bottom Ash and Steel Slag Containing CaO into Electrically Insulating and Heat-Dissipating Thermal Interface Materials / J. H. Kang, M.G. Kang, J.J. Hong [et al.] // Advanced Energy and Sustainability Research. – 2025. – No. 6. – Art. 2400291.
7. Goncharova, M. A. Structure Formation and Technologies of General and Special Purpose Composites Based on Underutilized Metallurgical Waste / M. A. Goncharova, E. M. Chernyshov. – Voronezh : VSTU, 2022. – 156 p.
8. Jaber, A. Sustainable Polymer Composites from Industrial Wastes / A. Jaber, E. N. Dresvyanina // Reviews on Advanced Materials and Technologies. – 2025. – Vol. 7, No. 1. – P. 24-52.
9. Valorization of steel slag in clay: Thermophysical study and energy simulation in Oujda (Morocco) / M. Kaddouhi, M. Drissi, O. Horma [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2025. – Vol. 680. – Art. 00103.

## ЭВОЛЮЦИЯ СИЛОВЫХ И ТРАДИЦИОННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

### EVOLUTION OF TRADITIONAL AND ALTERNATIVE POWER PLANT

**Стородубцева Т.Н.**, доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Storodubtseva T.N.**, DrSc in Technical Sciences, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Морковин В.А.**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Morkovin V.A.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Industrial Transport, Construction, and Geodesy, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Никитский В.А.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Nikitskiy V.A.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье рассматривается эволюция силовых установок транспортных средств – от двигателя внутреннего сгорания (ДВС), доминировавшего на протяжении более ста лет, до современных альтернативных технологий: электрических, гибридных, газовых и водородных агрегатов. Анализируются ключевые этапы технологического развития ДВС, включая совершенствование систем топливоподачи, снижение токсичности отработавших газов и повышение термического КПД. Особое внимание уделяется факторам, обусловившим активное распространение альтернативных силовых установок: ужесточению экологических требований, росту цен на нефтепродукты, прогрессу в области накопителей электроэнергии и государственной политике декарбонизации транспортного сектора. Проводится сравнительный анализ технико-экономических и экологических характеристик различных типов силовых агрегатов с применением методологии оценки жизненного цикла (LCA). Показано, что переход к альтернативным силовым установкам носит не революционный, а постепенный эволюционный характер и сопряжен с необходимостью решения комплекса инфраструктурных, экономических и технологических задач. Сделан вывод о том, что в среднесрочной перспективе наиболее вероятным сценарием является сосуществование различных типов силовых агрегатов с постепенным увеличением доли электрифицированного транспорта.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания (ДВС), электродвигатель, силовая установка, электромобиль, топливный элемент, водородный двигатель.

**Abstract.** This article examines the evolution of vehicle powertrains – from the internal combustion engine (ICE), which has dominated for over a century, to contemporary alternative technologies including electric, hybrid, compressed natural gas (CNG) and hydrogen powertrains. Key milestones in ICE technological development are analysed, encompassing advances in fuel injection systems, exhaust emission reduction, and improvements in thermal efficiency. Particular attention is paid to the factors driving the widespread adoption of alternative powertrains: increasingly stringent environmental regulations, rising petroleum prices, breakthroughs in energy storage technologies, and government decarbonisation policies targeting the transport sector. A comparative assessment of the technical, economic, and environmental performance of various powertrain types is conducted using Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The study demonstrates that the transition to alternative powertrains is not revolutionary but gradual and evolutionary in nature, requiring the resolution of a complex set of infrastructural, economic, and technological challenges. It is concluded that, in the medium term, the most probable scenario is the coexistence of multiple powertrain types, with the share of electrified vehicles increasing progressively.

**Keywords:** internal combustion engine (ICE), electric motor, power plant, electric car (EC), fuel cell, hydrogen engine.

Силовая установка – это главная часть любого транспортного средства. Больше 130 лет эту роль выполнял двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – бензиновый или дизельный агрегат, который превращает энергию топлива в движение. Именно двигатель внутреннего сгорания дал толчок массовому производству автомобилей и строительству дорог по всему миру.

Однако начиная с 1990-х годов, ДВС начал уступать позиции. Появились новые типы силовых установок: электромоторы на аккумуляторах, гибриды, объединяющие ДВС и электрическую тягу, газовые двигатели, а также водородные установки на топливных элементах. Каждое из этих решений по-своему использует энергию и по-разному влияет на экологию.

Настоящая статья посвящена комплексному рассмотрению этого масштабного технологического перехода: его движущих сил, накопленных результатов и перспектив развития в горизонте ближайших десятилетий.

Актуальность исследования определяется совокупностью взаимосвязанных факторов, формирующих запрос на глубокое научное осмысление происходящих трансформаций в транспортном секторе.

Транспортный сектор генерирует около 24 % глобальных выбросов CO<sub>2</sub>, занимая второе место среди всех отраслей экономики после энергетики. Ратификация Парижского соглашения 2015 года и принятие национальных стратегий углеродной нейтральности создали жёсткие нормативные рамки для автопроизводителей. Европейский союз в Регламенте (EU) 2023/851 закрепил запрет на продажу новых автомобилей с ДВС с 2035 года; аналогичные меры готовятся в Великобритании, Канаде и ряде штатов США. В этих условиях исследование альтернативных силовых установок приобретает стратегическое значение.

Стоимость литий-ионных аккумуляторов снизилась с 1 200 долл./кВт·ч в 2010 году до менее 100 долл./кВт·ч к 2024 году – то есть более чем в 12 раз за 14 лет. Этот беспрецедентный

ценовой обвал сделал электромобили экономически конкурентоспособными на массовом рынке и запустил эффект масштаба в производстве электрических трансмиссий.

Зависимость от импорта нефти стала проблемой для большинства стран. Резкие скачки цен на нефть, особенно в период 2022-2024 годов, подтолкнули правительства активнее переходить на электрический транспорт. Для России это не только вызов, но и шанс: страна богата ресурсами для производства аккумуляторов – литием, никелем, кобальтом, а значит, переход на альтернативные двигатели вполне выгоден экономически [1, 2].

Несмотря на очевидный мировой курс на электрификацию транспорта, среди ученых и инженеров остаются спорные вопросы, которые и составляют главную проблему данного исследования.

Многие говорят об экологической пользе электромобилей, но считают только выбросы во время езды. При этом забывают, что само производство батареи емкостью 75 кВт/ч выбрасывает от 4 до 15 тонн CO<sub>2</sub> – в зависимости от того, какая энергетика используется на заводе. Получается, что в странах, где много угольных электростанций, электромобиль может быть даже вреднее для экологии, чем обычный гибрид (рисунок 1).

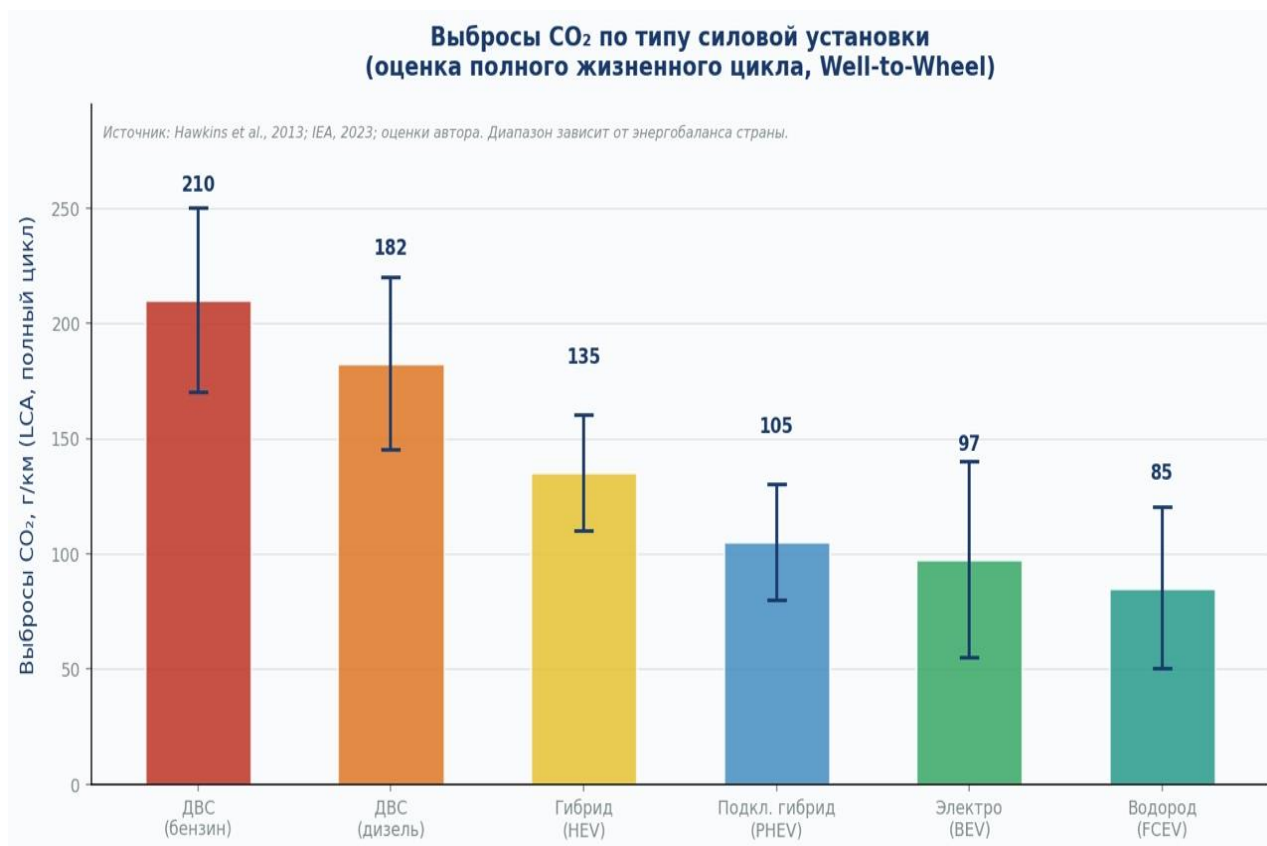


Рисунок 1 – График выброса CO<sub>2</sub> по типу установки

Глобальная зарядная инфраструктура для электромобилей по-прежнему существенно уступает по плотности и доступности традиционным автозаправочным станциям. Среднее время зарядки от быстрых зарядных устройств (DC fast charging) составляет 20-45 минут против 3-5 минут для заправки ДВС. В условиях протяженных российских территорий с

низкой плотностью населения это создаёт принципиально иные требования к планированию зарядной сети по сравнению с компактными европейскими странами [1, 3].

К 2030 году объем отработавших литий-ионных аккумуляторов превысит 11 миллионов тонн в год в мировом масштабе. Промышленные технологии рециклинга аккумуляторов (гидрометаллургия, пирометаллургия) пока способны извлекать лишь 50-70 % ценных материалов, а экономика замкнутого цикла для батарей еще не сформирована в полной мере. Это создает риск замены одной экологической проблемы – выбросов от ДВС – другой: накопления токсичных отходов.

Целью исследования является разработка комплексной сравнительной оценки технологической эволюции традиционных и альтернативных силовых установок транспортных средств, а также формулирование научно обоснованных рекомендаций по стратегии технологического перехода транспортного сектора.

Для достижения поставленной цели определены следующие исследовательские задачи:

1) проследить историческую эволюцию ДВС и установить закономерности его технологического совершенствования [4, 5];

2) систематизировать и классифицировать существующие типы альтернативных силовых установок по принципу действия, области применения и степени технологической зрелости;

3) провести сравнительный анализ технико-экономических показателей различных типов силовых агрегатов на основе методологии оценки полного жизненного цикла (LCA);

4) выявить структурные барьеры и движущие силы перехода к альтернативным силовым установкам в глобальном и российском контексте [6];

5) разработать сценарии развития рынка силовых агрегатов в горизонте 2030-2050 годов.

Решение обозначенных проблем требует комплексного подхода, объединяющего технологические, экономические, регуляторные и инфраструктурные меры. Ниже представлены ключевые направления и конкретные механизмы.

В Европе уже действует правило: на главных дорогах каждые 60 км должна быть быстрая зарядка мощностью от 150 кВт – и все это к 2025 году. В России из-за больших расстояний лучше всего строить крупные зарядные станции в городах и вдоль трасс, а также в первую очередь переводить на электричество городской транспорт – автобусы и такси. Их маршруты известны заранее, поэтому заряжать их удобнее. Одновременно нужно развивать водородные заправки для тяжелого транспорта – грузовиков, поездов, самолетов. Там обычные батареи слишком тяжелые и просто не подходят.

Проблему утилизации батарей можно решить, создав целые отрасли по их переработке. Европейский закон о батареях 2023 года обязывает производителей использовать в новых батареях определенную долю переработанных материалов – лития, кобальта, никеля и марганца. Есть еще одна хорошая идея – «вторая жизнь» батарей. Аккумулятор, который уже не тянет электромобиль как раньше (потерял 20-30 % емкости), еще вполне способен работать как домашний или промышленный накопитель энергии – и служить так еще 7-10 лет. Это выгодно и для кошелька, и для экологии [7].

Таким образом, переход от привычных двигателей к новым – один из самых больших технологических сдвигов в истории. ДВС развивался 130 лет и уже достиг своего предела. Главный вывод исследования: нет одного универсального решения для всех – разным видам транспорта нужны разные технологии. Лучшая политика – не продвигать какую-то одну технологию, а снижать общий вред для климата на протяжении всего срока службы техники. Три главных направления на будущее: развитие электрической и водородной тяги, улучшение переработки батарей и создание новой инфраструктуры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, А. М. Перспективы развития водородных транспортных средств в условиях российского рынка / А. М. Иванов, С. В. Петров // Транспорт на альтернативном топливе. – 2022. – № 4(88). – С. 22-31.
2. Агентство по технологическому развитию (АТР). Перспективы развития электромобильного транспорта в Российской Федерации : аналитический доклад. – Москва : АТР, 2022.
3. Кравченко, Е. А. Альтернативные источники энергии для транспортных средств : учеб. пособие / Е. А. Кравченко. – Санкт-Петербург : Политехника, 2020. – 312 с.
4. Автомобильные двигатели : современные тенденции развития / под ред. М. С. Ховаха. – Москва : Транспорт, 2019. – 396 с.
5. Назаров, И. В. Двигатели внутреннего сгорания : теория и практика / И. В. Назаров, В. Ф. Чабан. – Москва : Машиностроение, 2018. – 480 с.
6. Возобновляемая энергия : опыт регионов и потенциал малых городов России / А. С. Черных, Т. Н. Стородубцева, И. Ю. Рублев, Ю. А. Осыкина // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : материалы международной научно-практической конф., Воронеж, 20 июня 2025 г. / ВГАУ имени императора Петра I. – Воронеж, 2025. – С. 44-48.
7. Стородубцева, Т. Н. Отходы древесины как ресурс для производства биоэнергии и биотоплива / Т. Н. Стородубцева, М. Л. Шабанов, В. В. Петряник // Инновационные научные исследования 2025 : сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса, 05 июля 2025 г. – Пенза, 2025. – С. 32-35.

### REFERENCES

1. Ivanov, A. M. Prospects for the development of hydrogen vehicles in the Russian market / A. M. Ivanov, S. V. Petrov // Transport on alternative fuels. – 2022. – No.4(88). – P. 22-31.
2. Agency for Technological Development (ATR). Prospects for the Development of Electric Vehicle Transport in the Russian Federation : Analytical Report. – Moscow : ATR, 2022.
3. Kravchenko, E. A. Alternative Energy Sources for Vehicles: Textbook. / E. A. Kravchenko. – Saint-Petersburg : Politekhnik, 2020. – 312 p.
4. Automotive engines : modern development trends / edited M. S. Hovaha. – Moscow : Transport, 2019. – 369 p.
5. Nazarov, I. V. Internal combustion engines : theory and practice / I. V. Nazarov, V. F. Chaban. – Moscow : Mashinostroenie Publ., 2018. – 480 p.

6. Renewable Energy : Regional Experience and Potential of Small Towns in Russia / A. S. Chernykh, T. N. Storodubtseva, I. Yu. Rublev, Yu. A. Osykina // Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society : Proceedings of the International Scientific and Practical Conf., Voronezh, June 20, 2025 / Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great. – Voronezh, 2025. – P. 44-48.

7. Storodubtseva, T. N. Wood waste as a resource for the production of bioenergy and biofuels / T. N. Storodubtseva, M. L. Shabanov, V. V. Petryanik // Innovative scientific research 2025 : collection of articles of the International Scientific Research Competition, July 5, 2025. – Penza, 2025. – P. 32-35.

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСНОВНЫХ ВИДОВ НЕТРАДИЦИОННЫХ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

### COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF MAIN NON-TRADITIONAL AND RENEWABLE ENERGY SOURCES

**Стородубцева Т.Н.**, доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Storodubtseva T.N.**, DrSc in Technical Sciences, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Муждаба З.М.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Muzhdabah Z.M.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Черников Э.А.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Chernikov E.A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные виды возобновляемых источников энергии (ВИЭ), их технические характеристики, эффективность и влияние на окружающую среду. Проведен сравнительный анализ солнечной, ветровой, гидроэнергетической, геотермальной энергетики и биоэнергетики по показателям коэффициента полезного действия, стабильности генерации и экологической безопасности. Отмечены главные преимущества ВИЭ, а именно снижение выбросов парниковых газов, снижение зависимости от ископаемого топлива и увеличение энергетической безопасности. Также рассмотрены основные недостатки, связанные с природными условиями, географическими ограничениями и воздействием на экосистемы.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, ветровая энергетика, гидроэнергетика, геотермальная энергия, биоэнергия, коэффициент полезного действия, экологическая безопасность.

**Abstract.** The article discusses the main types of renewable energy sources (RES), their technical characteristics, efficiency, and environmental impact. It provides a comparative analysis of solar, wind, hydropower, geothermal, and bioenergy based on their efficiency, stability of generation, and environmental safety. The article highlights the key advantages of RES, including reducing greenhouse gas emissions, decreasing dependence on fossil fuels, and improving energy security. It also discusses the main disadvantages associated with natural conditions, geographical limitations, and impacts on ecosystems.

**Keywords:** renewable energy sources, solar energy, wind energy, hydropower, geothermal energy, bioenergy, efficiency coefficient, environmental safety.

В условиях глобального роста энергопотребления и необходимости снижения негативного воздействия на окружающую среду все большее значение приобретают возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Главным направлением энергетической политики большинства государств мира приоритетное значение имеет развитие технологий ВИЭ. К основным видам возобновляемой энергетики относятся солнечная, ветровая, гидроэнергетика, геотермальная энергетика и биоэнергетика.

Использование возобновляемых источников энергии предоставляет возможность повысить энергетическую безопасность государств, минимизировать выбросы парниковых газов и уменьшить зависимость от ископаемого топлива. Исходя из результатов международных энергетических организаций, новые мощности электроэнергии в значительной степени создаются именно на основе ВИЭ, а их доля в мировом энергобалансе постоянно растет.

Возобновляемые источники энергии представляют собой природные ресурсы, которые восстанавливаются естественным образом и могут использоваться для производства тепловой и электрической энергии [1, 2]. Важной характеристикой любой энергетической установки является ее эффективность, которая определяется коэффициентом полезного действия (КПД), коэффициентом использования, установленной мощностью, экономической эффективностью и экологической безопасностью. Существует диаграмма (рисунок 1), которая показывает сравнительный коэффициент полезного действия (КПД) в процентах для разных видов возобновляемых источников энергии.

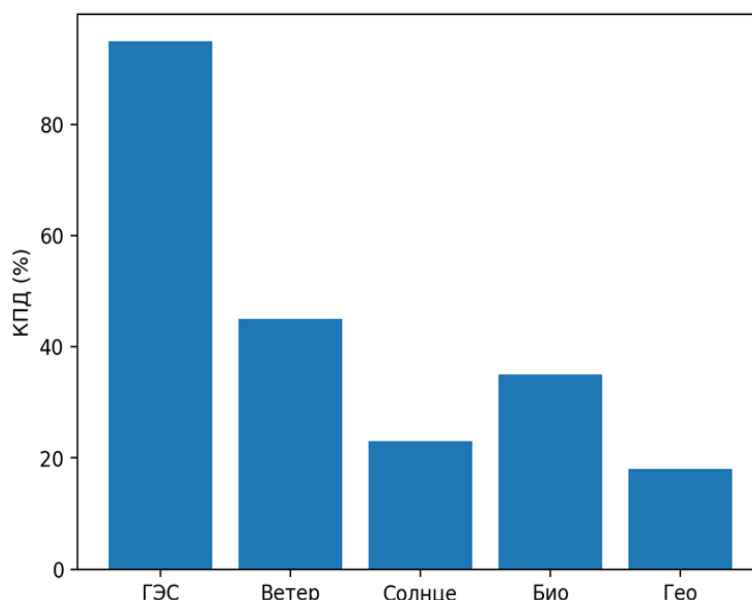


Рисунок 1 – Диаграмма сравнения КПД различных НВИЭ

К основным видам ВИЭ относятся:

1. Солнечная энергия – основана на использовании энергии солнечного излучения. Основными методами ее преобразования являются фотоэлектрические солнечные батареи, солнечные тепловые установки и концентрирующие солнечные электростанции [1]. КПД современных фотоэлектрических модулей составляет примерно 20-24 %. Коэффициент использования установленной мощности обычно находится в пределах 15-25 % из-за зависимости генерации от времени суток, погодных условий и географического положения [3]. К преимуществам солнечной энергетики относится экологическая чистота, практически неограниченный ресурс энергии и возможность установки в различных масштабах. К недостаткам относится требовательность к погодным условиям и необходимость больших площадей для их размещения [4].

2. Энергия ветра – основана на преобразовании кинетической энергии воздушных потоков в механическую, а затем в электрическую энергию [2]. Основным элементом такой установки является ветряная турбина, приводящая в действие электрогенератор [1]. Теоретический предел эффективности ветровой турбины определяется законом Беца и составляет 59,3 %. На практике современные ветроустановки имеют коэффициент использования мощности около 30-50 % [3]. Преимуществами ветровой энергетики являются высокая энергетическая эффективность, низкая стоимость электроэнергии и быстрое строительство электростанций. К недостаткам относится нестабильность ветрового режима, шумовое воздействие и влияние на ландшафт [4].

3. Гидроэнергия – является одним из наиболее развитых видов возобновляемой энергетики [2]. Она основана на использовании энергии движущейся воды. Гидроэлектростанции преобразуют потенциальную энергию воды в электрическую с помощью гидротурбин и генераторов [1]. КПД современных гидротурбин может достигать 90 % [3]. Преимуществами гидроэнергетики является высокая эффективность, стабильность производства энергии и долгий срок эксплуатации станций. К недостаткам относится значительное влияние на экосистемы, затопление территорий и высокая стоимость строительства.

4. Геотермальная энергия – основана на использовании тепловой энергии недр Земли. Геотермальные электростанции работают на основепара из глубинных слоёв земной коры или горячей воды [1]. КПД геотермальных электростанций обычно составляет 10-20 % [3, 5]. Их преимуществом является стабильность генерации, низкие выбросы парниковых газов и постоянная выработка энергии. К недостаткам относится ограниченность географических районов и высокая стоимость бурения.

5. Биоэнергия основана на использовании органических материалов (биомассы) для производства энергии [2]. К основным видам сырья относится древесина, сельскохозяйственные отходы, биогаз и энергетические культуры [1, 6]. КПД биоэнергетических установок может составлять 20-40 % [3]. Преимуществами биоэнергетики является возможность утилизации отходов, возобновляемость сырья и снижение выбросов парниковых газов. К недостаткам относится необходимость больших земельных ресурсов и конкуренция с сельским хозяйством [4].

Практически неисчерпаемый характер возобновляемых источников энергии является главным преимуществом. Существует диаграмма (рисунок 2), показывающая уровень

выбросов углекислого газа различными источниками энергии. Традиционные источники наносят больший урон окружающей среде. На диаграмме изображен наносимый различными источниками урон по экологии. Исходя из диаграммы следует, что уголь имеет наибольшее количество выбросов углекислого газа в окружающую среду [4].

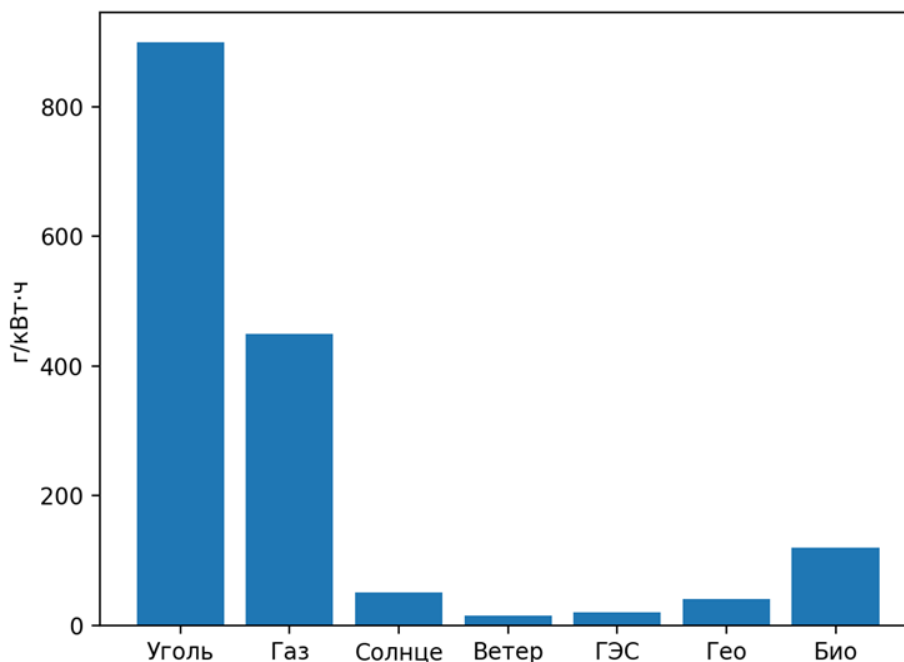


Рисунок 2 – Диаграмма выбросов CO<sub>2</sub> различных источников энергии

Распространение использования возобновляемых источников энергии сократит использование ископаемого топлива и выбросы CO<sub>2</sub>. Строительство ГЭС, выращивание биомассы и шумовое воздействие так же вредит окружающей среде, но значительно меньше традиционных источников энергии [4].

Использование всех видов нетрадиционных возобновляемых источников энергии обеспечит стабильное и экологичное развитие энергетики [3, 7].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдаев, И. В. Возобновляемые источники энергии / И. В. Юдаев, Ю. В. Даус, В. В. Гамага. – Санкт-Петербург : Лань, 2026. – 280 с.
2. Денисова, И. А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / И. А. Денисова, В. В. Денисов, В. В. Гутенев. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2015. – 350 с.
3. Сибикин, Ю. Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин. – Москва : КноРус, 2021. – 240 с.
4. Экологическая оценка возобновляемых источников энергии / Г. В. Пачурин, Е. Н. Соснина, О. В. Маслеева, Е. В. Крюков. – Санкт-Петербург : Лань, 2025. – 312 с.
5. Возобновляемая энергия : опыт регионов и потенциал малых городов России / А. С. Черных, Т. Н. Стородубцева, И. Ю. Рублев, Ю. А. Осыкина // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : материалы международной

научно-практической конф., Воронеж, 20 июня 2025 г. / ВГАУ имени императора Петра I. – Воронеж, 2025. – С. 44-48.

6. Стородубцева, Т. Н. Отходы древесины как ресурс для производства биоэнергии и биотоплива / Т. Н. Стородубцева, М. Л. Шабанов, В. В. Петряник // Инновационные научные исследования 2025 : сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса, 05 июля 2025 г. – Пенза, 2025. – С. 32-35.

7. Городова, Р. В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Р. В. Городова, В. Е. Губина, А. С. Матвеева. – Москва, 2009. – 220 с.

## REFERENCES

1. Yudaev, I. V. Renewable Energy Sources / I. V. Yudaev, Yu. V. Daus, V. V. Gamaga. – Saint-Petersburg : Lan, 2026. – 280 p.

2. Denisova, I. A. Alternative and Renewable Energy Sources / I. A. Denisova, V. V. Denisov, V. V. Gutenev. – Rostov-on-Don : Phoenix, 2015. – 350 p.

3. Sibikin, Yu. D. Alternative and Renewable Energy Sources / Yu. D. Sibikin, M. Yu. Sibikin. – Moscow : KnoRus, 2021. – 240 p.

4. Environmental Assessment of Renewable Energy Sources / G. V. Pachurin, E. N. Sosnina, O. V. Masleeva, E. V. Kryukov. – Saint-Petersburg : Lan, 2025. – 312 p.

5. Renewable Energy: Regional Experience and Potential of Small Towns in Russia / A. S. Chernykh, T. N. Storodubtseva, I. Yu. Rublev, Yu. A. Osykina // Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society: Proceedings of the International Scientific and Practical Conf., Voronezh, June 20, 2025 / Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great. – Voronezh, 2025. – P. 44-48.

6. Storodubtseva, T. N. Wood waste as a resource for the production of bioenergy and biofuels / T. N. Storodubtseva, M. L. Shabanov, V. V. Petryanik // Innovative scientific research 2025: collection of articles of the International Scientific Research Competition, July 5, 2025. – Penza, 2025. – P. 32-35.

7. Gorodova, R. V. Alternative and Renewable Energy Sources / R. V. Gorodova, V. E. Gubina, A. S. Matveeva. – Moscow, 2009. – 220 p.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВЕ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

AUTOMATED QUALITY CONTROL FOR THE DISPOSAL OF POLYMER  
COMPOSITE MATERIALS IN CEMENT SYSTEMS

**Стородубцева Т.Н.**, доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Storodubtseva T.N.**, DrSc in Technical Sciences, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Шабанов М.Л.**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Shabanov M.L.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Ткачёв Д.А.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия.

**Tkachev D.A.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia.

**Аннотация.** Проблема утилизации полимерных композиционных отходов, образующихся в энергетическом секторе (кабельная изоляция, лопасти ветрогенераторов, элементы тепловых сетей), требует разработки эффективных методов переработки с возможностью автоматизированного контроля качества конечного продукта. В работе рассмотрены подходы к интеграции метода цементации полимерных отходов в систему управления отходами энергетических предприятий. Показано, что простое замещение песка измельченным пластиком без дополнительной обработки приводит к снижению прочностных характеристик. Однако совместное применение полимеров с минеральными добавками (кирпичный бой, микрокремнезём) позволяет компенсировать этот недостаток. Обоснована необходимость автоматизированного контроля критических параметров: гранулометрического состава отходов, точности дозирования компонентов, режимов твердения. Предложена структура автоматизированной системы контроля качества, включающая входной, операционный и выходной уровни.

**Ключевые слова:** полимерные отходы, цементные композиты, автоматизация контроля, управление качеством, энергетические системы, переработка композитов.

**Abstract.** The problem of recycling polymer composite waste generated in the energy sector (cable insulation, wind turbine blades, heating network elements) requires the development of effective processing methods with the possibility of automated quality control of the final product.

The paper considers approaches to integrating the method of cementation of polymer waste into the waste management system of energy enterprises. It is shown that simple replacement of sand with shredded plastic without additional treatment leads to a decrease in strength characteristics. However, the combined use of polymers with mineral additives (brick dust, microsilica) makes it possible to compensate for this drawback. The necessity of automated control of critical parameters is substantiated: particle size distribution of waste, accuracy of component dosing, curing conditions. The structure of an automated quality control system is proposed, including input, operational and output levels.

**Keywords:** polymer waste, cement composites, automation of control, quality management, energy systems, composite recycling.

Объемы полимерных отходов, образующихся в различных отраслях промышленности, растут с каждым годом. Особое место среди них занимают отходы энергетического комплекса: изоляция кабельных линий из сшитого полиэтилена, лопасти ветроэнергетических установок из стекло- и углепластиков, элементы тепловых сетей [1]. Эти материалы попадают на полигоны и будут разлагаться десятилетиями, создавая экологическую нагрузку. При этом строительная отрасль потребляет огромное количество природных ресурсов: песка, щебня, цемента. Логично попытаться соединить эти две проблемы и использовать полимерные отходы как часть строительных материалов.

Идея не новая, но долгое время считалось, что добавление пластика в бетон только ухудшает его свойства. Полимеры плохо сцепляются с цементным камнем, вокруг частиц пластика образуются пустоты, прочность падает [2]. Однако в последние годы появились исследования, показывающие, что при правильном подборе состава и использовании дополнительных компонентов можно получить материалы, не уступающие обычному бетону, а по некоторым параметрам даже превосходящие его [3].

Особый интерес представляет переработка армированных пластиков – стеклопластиков и углепластиков, широко применяемых в ветроэнергетике. Их сложно утилизировать обычными методами, но содержащиеся в них волокна могут стать хорошей армирующей добавкой для цементных композитов. Однако для обеспечения стабильного качества получаемых материалов необходимо внедрение автоматизированных систем контроля на всех этапах технологического процесса [4].

Цель работы – разработка и научное обоснование подходов к автоматизированному контролю качества утилизации полимерных композиционных отходов в составе цементных систем с использованием физико-химических методов структурной модификации.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- идентификация критических технологических параметров процесса утилизации, подлежащих автоматизированному контролю;
- исследование механизмов взаимодействия компонентов в малоклинкерных системах с полимерными отходами;
- анализ методов оценки свойств получаемых композитов с точки зрения возможности их автоматизации;
- разработка структуры автоматизированной системы контроля качества.

Для проведения исследований использовались материалы, которые можно разделить на три группы: вяжущее, заполнители и модифицирующие добавки. В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н. Выбор этой марки обусловлен отсутствием в ее составе минеральных добавок, что позволяет объективно оценить влияние именно исследуемых компонентов на свойства композита. Удельная поверхность цемента составляла  $3560 \text{ см}^2/\text{г}$  [5]. В роли мелкого заполнителя использовался кварцевый песок с модулем крупности 2,1. Перед использованием песок просеивали через сито с размером ячеек 2,5 мм для удаления крупных включений.

В качестве модифицирующих компонентов применялись:

Сшитый полиэтилен (РЕХ) – отходы кабельной изоляции энергетических сетей. Выбор этого материала связан с тем, что сшитый полиэтилен практически не перерабатывается термическими методами из-за трехмерной структуры, но может использоваться как наполнитель. Материал измельчали в среде жидкого азота для получения частиц неправильной формы размером 1-4 мм. Такая форма обеспечивает лучшее механическое сцепление с цементной матрицей. Контроль гранулометрического состава осуществлялся с использованием лазерного анализатора частиц.

Кирпичный бой – отходы керамического производства. Химический состав боя включал:  $\text{SiO}_2$  – 68,4 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 14,2 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 5,1 %,  $\text{CaO}$  – 4,3 %. Материал измельчали до фракции 0-5 мм. Согласно литературным данным, тонкомолотый кирпичный бой проявляет пуццолановую активность за счет содержания аморфизованных глинистых минералов, прошедших обжиг [6, 7].

В ряде анализируемых исследований использовались строительные отходы со схожими характеристиками: удельная поверхность  $5700 \text{ см}^2/\text{г}$ , суммарное содержание оксидов кремния, алюминия и железа – 82,91 %, содержание активного кремнезема – 35,10 % [4, 8].

Исследования проводились по стандартным и специальным методикам, принятым в строительном материаловедении, с акцентом на возможность автоматизации контрольных операций.

Изготавливались образцы-балочки размером  $40 \times 40 \times 160$  мм. Состав смеси: цемент и песок в соотношении 1:3. Водоцементное отношение (В/Ц) составляло 0,45 и поддерживалось постоянным для всех составов. Дозирование компонентов осуществлялось с использованием автоматических весовых дозаторов с точностью  $\pm 1$  %.

Часть песка замещалась отходами в следующих количествах:

- стеклопластик – от 5 до 15 % по массе;
- сшитый полиэтилен – от 5 до 10 %;
- комбинированный состав: 5 % полиэтилена + 15 % кирпичного боя.

Образцы твердели в течение 28 суток в камере нормального твердения при температуре  $20 \pm 2$  °С и относительной влажности воздуха не менее 95 % [9]. Контроль параметров твердения осуществлялся автоматизированной системой сбора данных с термодатчиков и гигрометров.

Испытания на прочность при сжатии и изгибе проводились на гидравлическом прессе с автоматической системой нагружения и регистрации данных. Для каждого состава

испытывалось не менее трех образцов, результаты усреднялись в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012.

Для изучения фазового состава и микроструктуры применялся рентгенофазовый анализ на дифрактометре Bruker D2 Phaser (излучение  $\text{CuK}\alpha$ ). Съемка велась в диапазоне углов  $5-60^\circ$ . Расшифровка дифрактограмм производилась с использованием банков данных и программного обеспечения для автоматической идентификации фаз.

Пуццолановая активность определялась ускоренным химическим методом, основанным на способности материала связывать гидроксид кальция из насыщенного раствора. Образцы выдерживали в растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с начальной концентрацией 17,68 ммоль/л при температуре  $40^\circ\text{C}$ . Снижение концентрации ионов кальция фиксировали через определенные промежутки времени с использованием ионоселективных электродов, подключенных к системе автоматической регистрации данных.

Содержание свободной извести определяли этилово-глицератным методом, который основан на способности глицерина образовывать с гидроксидом кальция растворимый глицерат кальция [10].

Анализ результатов показывает, что характер влияния полимерных отходов на свойства цементного композита зависит не только от количества вводимой добавки, но и от ее сочетания с другими компонентами. Автоматизированный контроль состава позволяет поддерживать стабильность этих параметров.

При введении только сшитого полиэтилена наблюдается снижение прочности на сжатие пропорционально доле замещения. Это объясняется гидрофобностью полимерных частиц: на их поверхности не формируются прочные связи с продуктами гидратации цемента, и они работают как «включения-пустоты». Однако важно отметить, что даже при этом композит сохраняет целостность, а предел прочности на сжатие для составов с 5-10 % полиэтилена составляет от 20 до 40 МПа в зависимости от рецептуры. Автоматизированный контроль прочности позволил получить статистически достоверные данные с минимальной погрешностью [11].

Совершенно иная картина наблюдается при совместном использовании полиэтилена и кирпичного боя. В этом случае удается получить материал плотностью 1750-2000  $\text{кг}/\text{м}^3$  с прочностью 20-40 МПа, причем нижний предел достигается при максимальном содержании полимеров, а верхний – при их минимальном количестве в комбинации с кирпичным наполнителем. Автоматическое дозирование компонентов обеспечило точное соблюдение рецептуры для каждого состава.

Изучение микроструктуры таких композитов показало, что вокруг частиц полиэтилена формируется достаточно плотная кристаллическая «шуба» из гидросиликатов кальция, карбонатов и кварца. Это происходит благодаря двум факторам. Во-первых, частицы сшитого полиэтилена имеют неправильную форму и шероховатую поверхность за счет содержания технического углерода, что обеспечивает хорошее механическое зацепление – измеренная адгезия составила 0,98 МПа, что сопоставимо с адгезией цементного камня к полированной поверхности каменных заполнителей. Во-вторых, тонкодисперсный кирпичный бой вступает в реакцию с гидроксидом кальция, продукт этой реакции заполняет приграничную зону,

дополнительно уплотняя ее. Автоматизированный рентгенофазовый анализ позволил количественно оценить фазовый состав приграничной зоны.

С экономической и экологической точек зрения применение кирпичного боя вполне оправдано. По имеющимся данным, его стоимость примерно на 25 % ниже, чем у цемента [12]. Кроме того, использование этого отхода снижает нагрузку на полигоны ТБО и уменьшает потребность в разработке новых карьеров для добычи природных заполнителей.

Поведен анализ пуццолановой активности. Под пуццолановой активностью понимают способность материала в тонкоизмельченном состоянии при обычной температуре вступать в химическое взаимодействие с гидроксидом кальция, образуя соединения, обладающие вяжущими свойствами.

Среди техногенных материалов наиболее высокой пуццолановой активностью обладает микрокремнезём – отход производства ферросплавов. Его активность обусловлена высоким содержанием аморфного диоксида кремния (до 95 %) и чрезвычайно малой величиной частиц. Исследования показывают, что микрокремнезём интенсивно поглощает  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  уже в первые двое суток, что значительно ускоряет набор прочности композитом в раннем возрасте. Однако микрокремнезём – достаточно дорогой продукт, и его применение экономически оправдано только для высокопрочных бетонов специального назначения [6].

Кирпичный бой, как показали исследования, тоже обладает пуццолановой активностью, хотя и менее выраженной, чем у микрокремнезёма. Содержание активного кремнезёма в нем составляет около 35 %, а сумма оксидов  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  достигает 82-83 %. Активность кирпичного боя объясняется тем, что при обжиге глины в процессе производства кирпича происходит аморфизация глинистых минералов, и они приобретают способность реагировать с известью. Автоматизированный контроль пуццолановой активности с использованием ионоселективных электродов позволил получить воспроизводимые результаты.

Интересные результаты получены при совместном использовании кирпичного боя и микрокремнезёма. Добавка всего 5 % микрокремнезёма к кирпичному бою позволяет существенно повысить пуццолановую активность смеси, делая ее сопоставимой по эффективности с чистыми пуццоланами. Это открывает возможность получать эффективные минеральные добавки при минимальных затратах.

С экологической точки зрения использование пуццолановых добавок позволяет сократить долю клинкера в цементе, а значит, снизить выбросы  $\text{CO}_2$ , поскольку производство клинкера сопровождается выделением этого газа как при декарбонизации известняка, так и при сжигании топлива.

На основе проведенных исследований предложена структура автоматизированной системы контроля качества утилизации полимерных композиционных отходов в составе цементных систем.

Система включает три уровня контроля.

Входной контроль. На данном этапе осуществляется контроль гранулометрического состава измельченных отходов с использованием лазерных анализаторов частиц, определение влажности и химического состава с применением спектральных методов. Полученные данные автоматически заносятся в базу данных и используются для корректировки рецептуры.

Операционный контроль. На этапе приготовления смеси осуществляется автоматическое дозирование компонентов с использованием весовых датчиков и программируемых логических контроллеров (ПЛК). Контролируются: масса цемента, песка, полимерных отходов, модифицирующих добавок, водоцементное отношение, время перемешивания. Параметры твердения (температура, влажность) регистрируются автоматически.

Выходной контроль. После завершения твердения осуществляется автоматизированное определение прочности на гидравлическом прессе с системой регистрации данных, а также рентгенофазовый анализ микроструктуры с использованием автоматической идентификации фаз [5].

Интеграция всех уровней контроля в единую систему позволяет формировать электронный паспорт качества каждой партии материала, что обеспечивает прослеживаемость и соответствие заданным требованиям.

Наиболее перспективным направлением представляется комплексная переработка различных видов отходов, при которой недостатки одного материала компенсируются достоинствами другого. Автоматизация контроля позволяет управлять этим процессом с высокой точностью.

Один из удачных примеров такого подхода – технология, разработанная в рамках финского проекта по переработке стеклопластиков. Отходы стеклопластика подвергаются тонкому измельчению и затем подаются в цементную печь. Механизм здесь двойной: стекловолокно (состав которого включает до 50 %  $\text{SiO}_2$ , 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 20 %  $\text{CaO}$ ) играет роль сырьевой добавки, частично заменяя известняк и глину при обжиге клинкера, а полимерная матрица (обычно это термореактивные смолы) сгорает и дает дополнительное тепло. Таким образом, отход утилизируется полностью, без остатка.

Норвежские исследования подтвердили, что сжигание неперерабатываемых полимеров в цементных печах экологически безопасно при соблюдении технологического режима. Высокие температуры в печи (до 1450-1500 °С) и длительное пребывание газов в зоне высоких температур обеспечивают полное разложение любых органических соединений.

Экономические расчеты тоже говорят в пользу совместной переработки. По данным зарубежных исследователей, себестоимость такой технологии составляет около 25 долларов за тонну отходов, тогда как обычное сжигание на мусоросжигательных заводах обходится в 62 доллара за тонну. Разница существенная.

Главное ограничение сейчас – недостаточный объем отходов композитной промышленности. В мировом масштабе их образуется порядка 200 тысяч тонн в год, что для создания крупных перерабатывающих производств маловато. Тем не менее, отдельные страны уже инвестируют в эту сферу. Например, Финляндия вложила значительные средства в строительство линии по дроблению композитных отходов.

Таким образом, реализованный подход, сочетающий физико-химические методы структурной модификации цементных композитов с внедрением автоматизированной системы трехуровневого контроля, демонстрирует практическую возможность создания замкнутого технологического цикла утилизации полимерных композиционных отходов энергетического сектора. Использование автоматизации на этапах входного, операционного и

выходного контроля позволяет обеспечить стабильность свойств получаемых материалов, что является критически важным для внедрения таких технологий в реальное производство. Дальнейшее развитие предложенных решений будет способствовать решению актуальных задач цифровизации строительного комплекса и повышению экологической безопасности при обращении с отходами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Москва : Стандартиформ, 2013. – 32 с.
2. Несветаев, Г. В. Бетоны с использованием полимерных отходов / Г. В. Несветаев, Ю. И. Корякин // Строительные материалы. – 2018. – № 3. – С. 42-47.
3. Kalinkin, A. M. Mechanochemical activation of cement mixtures with polymer additives / A. M. Kalinkin, E. V. Kalinkina // Cement and Concrete Research. – 2019. – Vol. 118. – P. 45-53.
4. Calderón, V. Properties of Eco-Cement Blocks Made with Polymer Wastes / V. Calderón, R. Arroyo, C. Alía // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 412. – P. 134-142.
5. Шевченко, В. А. Переработка термореактивных полимерных композитов / В. А. Шевченко, В. В. Ковальчук // Пластические массы. – 2020. – № 5. – С. 28-32.
6. Сердюк, В. С. Утилизация отходов ветроэнергетики в строительных композитах / В. С. Сердюк, А. В. Кузнецов // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25, № 8. – С. 34-39.
7. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – Москва : Издательство АСВ, 2015. – 528 с.
8. Соломатов, В. И. Полимерные композиты в строительстве / В. И. Соломатов, А. Н. Бобрышев. – Москва : Стройиздат, 2016. – 240 с.
9. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 156 с.
10. Стородубцева, Т. Н. Композиционные материалы на основе техногенного сырья / Т. Н. Стородубцева. – Воронеж : ВГЛУ, 2022. – 184 с.
11. Федосов, С. В. Тепломассоперенос в цементных композитах с полимерными наполнителями / С. В. Федосов, В. Е. Румянцев. – Иваново : ИГАСУ, 2019. – 196 с.
12. Пономарёв, А. Н. Автоматизация контроля качества строительных материалов / А. Н. Пономарёв, С. А. Ермаков. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 288 с.

### REFERENCES

1. GOST 10180-2012. Concrete. Methods for Determining Strength Using Control Samples. Moscow: Standartinform, 2013. – 32 p.
2. Nesvetaev, G. V. Concrete Using Polymer Waste / G. V. Nesvetaev, Yu. I. Koryakin // Construction Materials. – 2018. – No. 3. – P. 42-47.
3. Kalinkin, A. M. Mechanochemical activation of cement mixtures with polymer additives / A. M. Kalinkin, E. V. Kalinkina // Cement and Concrete Research. – 2019. – Vol. 118. – P. 45-53.
4. Calderón, V. Properties of Eco-Cement Blocks Made with Polymer Wastes / V. Calderón, R. Arroyo, C. Alía // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 412. – P. 134-142.

5. Shevchenko, V. A. Recycling of Thermosetting Polymer Composites / V. A. Shevchenko, V. V. Kovalchuk // *Plastics*. – 2020. – No. 5. – P. 28-32.
6. Serdyuk, V. S. Utilization of Wind Energy Waste in Building Composites / V. S. Serdyuk, A. V. Kuznetsov // *Ecology and Industry of Russia*. – 2021. – Vol. 25, No. 8. – P. 34-39.
7. Bazhenov, Yu. M. Concrete Technology / Yu. M. Bazhenov. – Moscow : ASV Publishing House, 2015. – 528 p.
8. Solomatov, V. I. Polymer Composites in Construction / V. I. Solomatov, A. N. Bobryshev. – Moscow : Stroyizdat, 2016. – 240 p.
9. SP 63.13330.2018. Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions. – Moscow : Standartinform, 2019. – 156 p.
10. Storodubtseva, T. N. Composite Materials Based on Man-Made Raw Materials / T. N. Storodubtseva. – Voronezh : VGLTU, 2022. – 184 p.
11. Fedosov, S. V. Heat and Mass Transfer in Cement Composites with Polymer Fillers / S. V. Fedosov, V. E. Rumyantsev. – Ivanovo : IGASU, 2019. – 196 p.
12. Ponomarev, A. N. Automation of Quality Control of Building Materials / A. N. Ponomarev, S. A. Ermakov. – St. Petersburg : Lan, 2021. – 288 p.

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ  
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ЕГО РЕСУРС И НАДЕЖНОСТЬ**  
INFLUENCE OF THERMAL OPERATING MODE OF AN INTERNAL COMBUSTION  
ENGINE ON ITS LIFE AND RELIABILITY

**Тертерашвили Д.Г.**, аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Terterashvili D.G.**, Postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Дорохин С.В.**, доктор технических наук, профессор, декан автомобильного факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Dorokhin S.V.**, DrSc in Technical Sciences, Professor, Dean of the Automobile Faculty, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В работе представлен анализ эволюции систем охлаждения двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и исследовано влияние теплового режима на их ресурс и надежность. Особое внимание уделено негативным последствиям нарушения теплового режима. Проанализированы основные причины нарушения температурного режима, связанные с повышенными нагрузками и неисправностями системы охлаждения. Показано, что перегрев двигателя приводит к ухудшению условий смазки, увеличению механических напряжений и ускоренному износу основных деталей. В работе также рассмотрены принципы работы электронного термостата и электрической помпы, их преимущества (точность управления, снижение расхода топлива) и недостатки, связанные с усложнением конструкции, высокой стоимостью и сложностью диагностики. Отмечена важная роль системы охлаждения в обеспечении стабильного теплового состояния двигателя.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания (ДВС), головка блока цилиндра (ГБЦ), охлаждающая жидкость, тепловые нагрузки, деформация, перегрев, тепловой режим.

**Abstract.** This article presents an analysis of the evolution of internal combustion engine (ICE) cooling systems and examines the impact of thermal conditions on their service life and reliability. Particular attention is paid to the negative consequences of thermal imbalances. The main causes of thermal imbalances, associated with increased loads and cooling system malfunctions, are analyzed. It is shown that engine overheating leads to deterioration of lubrication conditions, increased mechanical stress, and accelerated wear of key components. The paper also examines the operating principles of electronic thermostats and electric pumps, their advantages (precise control, reduced fuel consumption), and their disadvantages associated with complex design, high cost, and difficult diagnostics. The important role of the cooling system in ensuring a stable engine thermal condition is highlighted.

**Keywords:** internal combustion engine, cylinder head, coolant, thermal loads, deformation, overheating, thermal regime.

Современные системы охлаждения ДВС (по сравнению с 30-летней давностью) стали интеллектуальными и высокоэффективными: вместо простого механического термостата используются электронно-управляемые, водяные насосы с электронным управлением вместо механических, высокотемпературные режимы работы для экологии и долговечные антифризы.

Основная цель изменений – быстрый прогрев ДВС до рабочей температуры, точное поддержание рабочей температуры и снижение веса.

Основные отличия современных систем охлаждения ДВС от конструкций прошлого века заключаются в следующем:

- Электронный термостат – устройство управляется электронным блоком управления (ЭБУ) двигателя, что позволяет заранее открывать контур при нагрузках, предотвращая перегрев, в то время как, ранее термостат имел точную температуру открытия обусловленной конструкцией механизма.

- Циркуляция охлаждающей жидкости системы охлаждения в современных двигателях осуществляется с помощью электрического насоса с переменной производительностью. Вместо постоянной работы помпы от ременного или цепного привода, применяются помпы, оснащенные электродвигателем внутри, которые также могут отключаться полностью при прогреве ДВС.

- Современные ДВС имеют жесткие требования к экологичности, что привело инженеров к разработке двигателей, рабочая температура охлаждающей жидкости которых выросла с 85-95 °С до 105-115 °С для лучшего сгорания топлива, что требует более точного контроля и надежных охлаждающих жидкостей [1, 2].

- Больше использование пластика (композитов) для снижения веса и долговечные антифризы (карбоксилатные, класс G12+/G13/G12++), не требующие замены по 5-10 лет [3].

- Современные системы часто имеют несколько контуров охлаждения (отдельно для головки блока цилиндров и отдельно для блока цилиндров) для повышения производительности [4-6].

Двигатель внутреннего сгорания в процессе эксплуатации работает в условиях значительных тепловых нагрузок, возникающих в результате сгорания топливовоздушной смеси и трения сопряженных деталей. Надежность и долговечность двигателя во многом определяются его тепловым режимом, который должен находиться в допустимых пределах (85-115 °С), обеспечивающих нормальные условия смазки, прочности и износостойкости деталей [1, 4].

Отклонение температурного режима от нормативных значений приводит к ухудшению рабочих характеристик двигателя, снижению экономичности и ускоренному износу основных узлов. Особенно опасным является перегрев, который вызывает снижение прочности материалов, нарушение тепловых зазоров, ухудшение условий смазки и возникновение дополнительных механических напряжений и деформаций [4, 7].

Поддержание оптимального теплового состояния обеспечивается системой охлаждения двигателя, исправность которой является необходимым условием надежной эксплуатации автомобиля. В реальных условиях эксплуатации нарушение работы элементов системы охлаждения может приводить к скрытому ухудшению теплового режима, что в дальнейшем вызывает преждевременные отказы [4, 7].

В связи с этим исследование влияния теплового режима работы двигателя внутреннего сгорания на его ресурс и надежность является актуальной задачей, направленной на повышение эффективности эксплуатации автомобильной техники.

Тепловой режим двигателя внутреннего сгорания определяется температурным состоянием его основных деталей и агрегатов в процессе работы. Наибольшее тепловыделение происходит в камере сгорания, откуда тепло передается поршню, цилиндру, головке блока цилиндров и другим элементам двигателя [3, 4].

Для обеспечения нормальной работы двигателя необходимо поддержание оптимальной температуры охлаждающей жидкости, которая для большинства бензиновых двигателей находится в диапазоне 85-115 °С. При этом обеспечиваются нормальные условия смазки, допустимые тепловые зазоры и требуемая прочность деталей [3, 4].

Нарушение теплового режима может происходить при повышенных нагрузках, высокой температуре окружающей среды, недостаточном уровне охлаждающей жидкости, а также при неисправностях системы охлаждения.

Перегрев двигателя является одной из наиболее распространенных причин снижения его ресурса. При повышении температуры выше допустимых значений происходит ухудшение физико-механических свойств материалов, снижение вязкости моторного масла и увеличение износа трущихся поверхностей.

Во время работы двигателя температура распределяется по ГБЦ неравномерно. Наиболее теплонагруженная зона – перемычки, находящиеся между клапанами в камере сгорания. Разница температур между этой зоной и более холодными краями головки может достигать 200 °С. Также из-за разницы температур разные части ГБЦ расширяются по-разному, что приводит к возникновению термических напряжений, которые составляют 180-220 МПа. Материалом ГБЦ, используемым в современных автомобилях, выступает алюминиевый сплав (АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ34, АК7ч, АК12ч, А1Si10Mg), предел прочности которого на растяжение в несколько раз ниже, чем на сжатие. При циклических множестве термоциклах в материале накапливаются остаточные деформации, что в итоге приводит к короблению всей плоскости детали [8, 9].

При перегреве детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) расширяются. Коэффициент линейного температурного расширения алюминиевого ( $26 \times 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>) сплава поршня выше, чем изготовленный из чугуна ( $10 \times 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>) или стали ( $12,5 \times 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>) цилиндр. При состоянии, когда технологический зазор между поршнем и цилиндром исчезает, поршень совершает сухое трение относительно цилиндра, что приводит к схватыванию деталей [8, 9].

При перегреве ДВС происходит резкий скачок давления в системе охлаждения. При закипании охлаждающая жидкость переходит в газообразное состояние, объем которого намного больше. Давление в рубашке охлаждения увеличивается и металлическая окантовка прокладки с композитным материалом, не рассчитанные на такие высокие значения давления

в системе охлаждения разрушаются. Наиболее прослабленным местом является перемычка между соседними цилиндрами или цилиндром и каналом охлаждения. Также при деформации плоскости ГБЦ вследствие перегрева ДВС, прокладка в местах нарушения плоскостности будет зажата неравномерно, что приводит к зоне пониженного прижима и позволяет газам и жидкости разрушить герметичность в этих местах прокладки [3, 8, 9].

При превышении рабочей температуры моторное масло теряет вязкость. Низкая вязкость моторного масла не позволяет создавать необходимую масляную пленку на трущихся деталях двигателя, что приводит к сухому трению, которое перерастает сначала в локальный перегрев, а затем в микроскопическое схватывание (задир). Стоит отметить, что большинство противоизносных, моющих, диспергирующих и антиокислительных присадок теряют свои свойства при температурах свыше 150-180 °С, а при перегреве двигателя свыше данной температуры, эти присадки, при разрушении, будут выпадать в осадок в виде отложений на днище поршня, масляных каналах, в масляном насосе, забивая тем самым всю систему смазки, что приведет к масляному голоданию и дальнейшему критическому разрушению ДВС [3, 4, 10].

Для обеспечения стабильности температурного диапазона работы двигателя, системы охлаждения оснащаются электронным термостатом и электрическим насосом с изменяемой производительностью.

Электронные термостаты автомобиля (рисунок 1) – это устройства системы охлаждения с электронным управлением (часто MAP-controlled), использующие встроенный нагревательный элемент для принудительного открытия. ЭБУ двигателя регулирует термостат за счет данных температуры ДВС в зависимости от нагрузки, улучшая эффективность сгорания, снижая вредные выбросы и предотвращая перегрев.

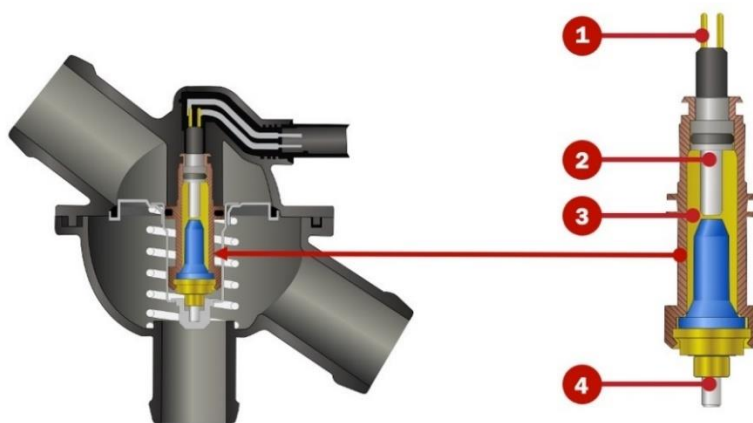


Рисунок 1 – Устройство электронного термостата автомобиля:

- 1 – электрический контакт; 2 – нагревающее сопротивление воскового элемента;  
3 – восковой элемент; 4 – шток

В отличие от полностью механических, электронный термостат имеет внутри воскового элемента нагревательную катушку. Когда ЭБУ подает на нее напряжение, воск нагревается, и термостат открывается раньше, чем при обычном нагреве от антифриза.

Электронный блок управления постоянно сравнивает температуру на карте с фактической температурой двигателя. На основании этой информации он отправляет определенный сигнал широтно-импульсной модуляции (или ШИМ-сигнал) на

нагревательный элемент термостата для управления им и поддержания открытого состояния, пока не будет достигнута требуемая температура. Низкий уровень ШИМ (напряжение не подается) соответствует высокой температуре охлаждающей жидкости, а высокий уровень ШИМ (напряжение подается) соответствует низкой температуре охлаждающей жидкости.

Сигнал широтно-импульсной модуляции, также называемый сигналом с прямоугольными импульсами – очень точное средство подачи определенного количества энергии на нагревательный элемент благодаря изменению коэффициента заполнения импульсов: управлению интервалами включения и выключения [5, 6].

При высокой температуре двигателя для быстрого понижения температуры охлаждающей жидкости могут потребоваться дополнительные меры. Блок управления может, например, включать электрические вентиляторы. Транспортные средства с электрическим водяным насосом, например, Gates 41504E (устанавливается в автомобили BMW с электрическим насосом в качестве основного водяного насоса), также могут автоматически увеличивать интенсивность потока охлаждающей жидкости. Такие термостаты позволяют осуществлять точный контроль температуры, что приводит к повышению эффективности двигателя и снижению вредных выбросов [5, 6].

Однако такое решение привело к усложнению и удорожанию конструкции системы охлаждения. Это привело к зависимости от электроники, увеличению количества проводов и датчиков.

Выход из строя такого термостата часто определяется только с помощью компьютерной диагностики ЭБУ. Блок управления обнаруживает электрические неисправности термостата и генерирует код неисправности в собственной памяти. Кроме того, в случае выхода из строя компонента системы управления температурой блок управления может принять соответствующие меры для компенсации, например, активировать вентилятор или использовать безопасный режим работы сопротивления термостата.

Следующим немаловажным электронным устройством, внедренным в современную систему охлаждения ДВС является электрический насос системы охлаждения (рисунок 2).



Рисунок 2 – Насос системы охлаждения электрической марки «BMW» с изменяемой производительностью

Применение таких устройств – это современное решение, которое постепенно заменяет традиционные механические водяные насосы с ременным или цепным приводом. Такие насосы используются в современных бензиновых, дизельных и гибридных двигателях, где требуется гибкое управление температурным режимом, снижение расхода топлива и повышение ресурса двигателя.

В отличие от классического насоса, он не зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя и может работать при заглушенном двигателе; управляется ЭБУ, что позволяет точно регулировать температуру [5, 6].

Такие насосы применяются, например, в двигателях BMW, Volkswagen, Toyota, Mercedes-Benz, а также в гибридных установках и турбированных моторах.

Основная причина перехода на электрический насос заключается в повышении КПД двигателя, обусловленная уменьшением механических потерь при вращении коленчатого вала, что также приводит к снижению расхода топлива на 1-3 %. Также внедрение такого насоса связано с точной регулировкой теплового режима, быстрым прогревом ДВС до рабочей температуры, его охлаждением после остановки, защитой турбины от перегрева [5, 6].

Однако такое устройство имеет ряд существенных недостатков, которые заключаются в следующем: высокая цена; сложная электроника; чувствительность к перегреву; отказ электрической помпы может мгновенно привести к перегреву двигателя; сложности при диагностировании.

Длительная работа двигателя при повышенном тепловом режиме существенно сокращает его ресурс и повышает вероятность отказа.

Неисправность любого из указанных элементов приводит к нарушению теплообмена и изменению теплового состояния двигателя. При этом на ранних стадиях отклонения могут быть незначительными и не фиксироваться штатными средствами контроля.

Таким образом, в работе рассмотрено влияние теплового режима работы двигателя внутреннего сгорания на его ресурс и надежность. Показано, что отклонение температуры от оптимальных значений приводит к ухудшению условий смазки, увеличению механических напряжений и ускоренному износу основных деталей двигателя.

Установлено, что перегрев является одной из наиболее распространенных причин преждевременного выхода двигателя из строя и может быть вызван нарушением работы системы охлаждения, недостатком охлаждающей жидкости или повышенными эксплуатационными нагрузками.

Отмечено, что традиционные способы контроля температуры не всегда позволяют своевременно выявлять начальные стадии нарушения теплового режима. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов контроля теплового состояния двигателя по эксплуатационным параметрам, что позволит повысить надежность и эффективность эксплуатации автомобильной техники.

Анализ показал, что внедрение электронных термостатов и электрических насосов сделало систему охлаждения более эффективной, но и более уязвимой с точки зрения диагностики. Перегрев двигателя, возникающий при скрытых отказах этих элементов, приводит к необратимым последствиям: деформации ГБЦ, задирам поршней и деградации масла. Учитывая высокую стоимость ремонта, своевременное выявление нарушений

теплового режима является ключевой задачей для обеспечения надежности современных автомобилей, что требует совершенствования методов мониторинга системы охлаждения двигателя автомобиля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К вопросу развития системы энергообразования двигателей внутреннего сгорания / А. И. Новиков, С. В. Дорохин, Т. П. Новикова, А. Г. Каширских // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, Воронеж, 20-21 марта 2014 года / под общей редакцией А.И. Новикова. Том 1. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2014. – С. 272-274.

2. Тертерашвили, Д. Г. Выбор и анализ датчиков для интеллектуальной системы диагностики системы охлаждения ДВС / Д. Г. Тертерашвили, С. В. Дорохин // Перспективы развития, инновации и информационные технологии на транспорте - 2025 : Материалы Международной молодежной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 23-24 октября 2025 года. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 255-259.

3. Способ оценки системы охлаждения двигателя и возможность прогнозирования неисправности ее механизмов / Д. Г. Тертерашвили, С. В. Дорохин, А. Р. Глушенков, Р. В. Мороз // Современные системы и технологии на транспорте : проблемы и перспективы : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 24-25 апреля 2025 года. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 260-265.

4. Вахламов, В. К. Автомобили: теория и конструкция автомобиля и двигателя / В. К. Вахламов, М. Г. Шатров, А. А. Юрчевский. – Москва : Изд. центр «Академия», 2010. – 816 с.

5. Соснин, Д. А. Электрическое, электронное и автотронное оборудование легковых автомобилей / Д. А. Соснин. – Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 379 с.

6. Акулова, А. А. Основы конструкции автомобилей : учеб. пособие / А. А. Акулова, Ю. Н. Строганов ; под общ. ред. канд. техн. наук, доц. Ю. Н. Строганова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 168 с.

7. Патент № 2698556 С2 РФ, МПК F01P 11/16, F01P 11/18, F01P 11/20. Способ диагностики системы хладагента двигателя (варианты) : № 2017111284 : заявл. 04.04.2017 : опубл. 28.08.2019 / С. Реджети, Р. Р. Джентц, А. М. Дудар [и др.] ; заявитель Форд Глобал Текнолоджиз, ЛЛК.

8. Автомобили. Конструкция и рабочие процессы / [А. М. Иванов и др.] ; под ред. В. И. Осипова. – Москва : Академия, 2012. – 378 с.

9. Межецкий, Г. Д. Теоретические основы повышения долговечности головок и крышек цилиндров дизелей / Г. Д. Межецкий, В. В. Чекмарев, А. А. Захаров // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2005. – №2. – С. 55-57.

10. Плахов, С. А. Совершенствование системы охлаждения двигателей автомобилей семейства «ВАЗ» / С. А. Плахов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 7-5. – С. 65-68.

## REFERENCES

1. On the development of the energy generation system of internal combustion engines / A. I. Novikov, S. V. Dorokhin, T. P. Novikova, and A. G. Kashirskikh // *Alternative Energy Sources for Road Transport: Problems and Prospects of Rational Use : Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the International Scientific and Practical Conference, Voronezh, March 20-21, 2014* / Edited by A. I. Novikov. Vol. 1. – Voronezh : Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2014. – P. 272-274.

2. Terterashvili, D. G. Selection and analysis of sensors for an intelligent diagnostic system for the internal combustion engine cooling system / D. G. Terterashvili, S. V. Dorokhin // *Development Prospects, Innovations and Information Technologies in Transport - 2025: Proceedings of the International Youth Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of the VSTU named after G. F. Morozov, Voronezh, October 23-24, 2025.* – Voronezh : Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2025. – P. 255-259.

3. Method for assessing the engine cooling system and the possibility of predicting the failure of its mechanisms / D. G. Terterashvili, S. V. Dorokhin, A. R. Glushenkov, R. V. Moroz // *Modern systems and technologies in transport: problems and prospects : Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of the VSTU named after G.F. Morozov, Voronezh, April 24-25, 2025.* – Voronezh : Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2025. – P. 260-265.

4. Vakhlamov, V. K. *Automobiles: Theory and Design of Automobiles and Engines* / V. K. Vakhlamov, M. G. Shatrov, A. A. Yurchevsky. – Moscow : Academy Publishing Center, 2010. – 816 p.

5. Sosnin, D. A. *Electrical, Electronic, and Autotronic Equipment of Passenger Cars* / D. A. Sosnin. – Moscow : SOLON-PRESS, 2010. – 379 p.

6. Akulova, A. A. *Fundamentals of Automobile Design: Textbook* / A. A. Akulova, Yu. N. Stroganov; edited by Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Yu. N. Stroganov. – Yekaterinburg : Publishing House of the Ural University, 2017. – 168 p.

7. Patent No. 2698556 C2 RF, IPC F01P 11/16, F01P 11/18, F01P 11/20. Method for diagnosing the engine coolant system (variants): No. 2017111284: declared 04.04.2017: published 28.08.2019 / S. Rejeti, R. R. Jentz, A. M. Dudar [et al.]; applicant Ford Global Technologies, LLC.

8. *Automobiles: Design and Operating Processes* / [A.M. Ivanov et al.]; edited by V. I. Osipov. – Moscow : Academy, 2012. – 378 p.

9. Mezheritsky, G. D. Theoretical foundations for increasing the durability of diesel cylinder heads and covers / G. D. Mezheritsky, V. V. Chekmarev, A. A. Zakharov // *Bulletin of the Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov.* – 2005. – No. 2. – P. 55-57.

10. Plakhov, S. A. Improving the cooling system of VAZ family cars / S. A. Plakhov // *Actual problems of humanitarian and natural sciences.* – 2016. – No. 7-5. – P. 65-68.

## **РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ РАБОТЫ ИНЖЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВАЗ 2105 НА СМЕСИ С ВОДЯНЫМ ПАРОМ**

DEVELOPMENT OF A SCHEME FOR RESEARCHING THE OPERATION OF A VAZ 2105  
INJECTOR ENGINE ON A MIXTURE WITH WATER VAPOR

**Толстов С.А.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Tolstov S.A.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Панченко С.Л.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Panchenko S.L.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Толстова А.С.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Tolstova A.S.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Набатов Д.Р.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Nabatov D.R.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Трощенко Р.В.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Troshchenko R.V.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Узунов К.А.**, студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

**Uzunov K.A.**, Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Аннотация.** В настоящее время во всем и остро стоит проблема по защите окружающей среды, а именно от вредных выбросов, содержащихся в продуктах сгорания топлива в атмосферу. Одним из основных поставщиков токсичных газов в атмосферу является автомобильный транспорт, снабженный двигателями внутреннего сгорания – самым распространенным тепловым двигателем в мире. С целью снижения токсичности выхлопных газов учеными и автоконцернами ведутся различные работы. Одно из направлений, использование водяного впрыска. С целью практического исследования работы ДВС на смеси с водой был разработан узел получения влажного насыщенного водяного пара и установлен

на автомобиль ВАЗ 2105. Экспериментальные исследования позволят внести вклад в изучение данного вопроса и показать возможность массового применения.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания (ДВС), автомобильный транспорт, топливо, экологические стандарты, впрыск воды, токсичные газы, экология.

**Abstract.** Currently, there is an urgent need to protect the environment from harmful emissions contained in the combustion products of fuel into the atmosphere. One of the main sources of toxic gases in the atmosphere is the automotive industry, which uses internal combustion engines, the most common type of heat engine in the world. Scientists and automotive companies are working on various methods to reduce the toxicity of exhaust gases. One of these methods is the use of water injection. To study the practical application of water injection in internal combustion engines, a system for producing moist saturated water vapor was developed and installed on a VAZ 2105 car. Experimental research will contribute to the study of this issue and demonstrate the possibility of mass application.

**Keywords:** heat engine (ICE), automobile transport, fuel, environmental standards, water injection, toxic gases, ecology.

В настоящее время во всем мире остро стоит проблема по защите окружающей среды, а именно от вредных выбросов, содержащихся в продуктах сгорания топлива в атмосферу. Таковыми в частности являются оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), оксиды углерода (CO), различные углеводороды ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ), оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ), соединения свинца, а также твердые частицы. Одним из основных поставщиков токсичных газов в атмосферу является автомобильный транспорт, снабженный двигателями внутреннего сгорания – самыми распространенными тепловыми двигателями в мире. При этом автомобиль сжигает за год около 5,5 тонн кислорода, что в 50 раз превышает потребность одного человека [1-3].

Цифры говорят сами за себя, поэтому необходимо срочно принимать меры, которые позволят сделать ДВС экологически «чистым». Теоретически возможно сделать работу ДВС совершенно безвредным для окружающей среды и человека. Для этого необходимо снабдить силовую установку дополнительными системами по нейтрализации и утилизации каждого из вредоносных компонентов, содержащихся в продуктах сгорания топлива и других системах, и элементах двигателя. Да, безусловно, эти системы значительно усложнят автомобильный транспорт. Увеличится стоимость автомобиля, его размер, усложнится техническое обслуживание, диагностика, ремонт и т.д. В настоящее время это не является возможным, в том числе и из-за отсутствия необходимых технологий. Тем не менее, наука не стоит на месте, ученые работают, технологии развиваются и в недалеком будущем, безусловно, ученые найдут пути решения проблемы. Это не сказка, ученые уже доказали такую возможность. Многие уже введено в практику [1-5].

В качестве примеров можно вспомнить хотя бы следующие. Большая работа проведена с топливом. Совершенствование технологий очистки и внедрение более чистых топлив привело к существенному снижению выбросов парниковых газов, оксидов азота и серы, что уменьшило количество кислотных дождей, снизило количество выбросов мелких твердых частиц. Повышение октанового числа топлива увеличило мощность двигателя.

Разработка каталитических нейтрализаторов и укомплектование ими современных ДВС позволило очистить выхлоп до 80 %, обеспечив соответствие автомобиля экологическим стандартам Евро-6.

Еще один пример. Установка сажевого фильтра на дизельный двигатель позволила улавливать твердые частицы сажи, очищая выхлоп на 80 %. Причем поначалу фильтры были одноразовыми, затем им на смену разработали самоочищающиеся, которые выжигают накопленную сажу при высокой температуре около 600 °С.

Совсем недавний пример по переходу на газовое топливо обещает значительно снизить вредные выбросы в атмосферу. Это инновационное внедрение обеспечено даже Государственной программой, что говорит о важности проблемы [4].

Все вышеприведенное – это огромная работа ученых, инженеров, исследователей и она уже, как видно, принесла положительные результаты. Однако, и в уже принятых, внедренных в конвейер мер имеются недостатки, требующие дальнейшего изучения, научного обоснования и доработки. Есть еще многое, над, чем можно подумать в доведении ДВС до экологически «чистого» двигателя. В частности, катализатор работает как химический нейтрализатор. Находящиеся внутри него специальные, обладающие высокой химической активностью металлы (платина, иридий, палладий, родий) дожигают остатки топлива и разлагают вредные соединения. К сожалению, пока что только эти дорогостоящие редкие металлы способны на такую экологическую работу и то не вечно. Со временем его ресурс падает, и он требует замены. Кроме того, работа катализатора наступает только после его прогрева до температуры 300 °С. Т.е. сразу после запуска двигателя он не работает. Работа катализатора также зависит от качества топлива. Таким образом, стоит задача в разработке и производстве дешевых, долговечных и работающих сразу после запуска двигателя катализаторов.

Несмотря на заявленные в западной Европе и других развитых странах мерах по запрету разработок и применению ДВС после 2030 года, отказаться от них пока не представляется возможным по ряду причин. Поэтому учеными и крупными автогигантами ведутся работы по усовершенствованию ДВС. Так Японская компания Kawasaki Heavy Industries сделала значительный шаг в этом направлении, представив первый в мире коммерческий крупный газовый ДВС серии KG, работающий на смеси природного газа с 30-процентной долей водорода по объёму. Подобное решение – это начало декарбонизации выработки электричества прямо сейчас без какой-либо переделки инфраструктуры, что является принципиально важным. Продажи новых силовых установок стартовали в сентябре 2025 года. Двигатель позиционируется как готовое к работе с водородом решение – переходная технология, позволяющая снижать выбросы CO<sub>2</sub> без полной замены существующей инфраструктуры газоснабжения, хранения и трубопроводов. Технически установка относится к поршневым газовым двигателям внутреннего сгорания. При использовании 30 % водорода мощность сохраняется на уровне работы, на чистом газе благодаря оптимизации камеры сгорания и систем подачи топлива. Важно, что уже более 240 двигателей серии KG, поставленных на множество электростанций с 2011 года, могут быть модернизированы для совместимости работы с водородом. Как сообщают представители фирмы, при добавлении 30 % водорода выбросы CO<sub>2</sub> снижаются примерно на 10-12 % [6].

Известные автопроизводители RENAULT и GEELY представили ДВС под 100 % возобновляемое топливо (производится из возобновляемых источников, не истощая ресурсы, как ископаемое топливо). Это громкая разработка в сфере классических моторов, но с прицелом на экологию и нормы Евросоюза. Над новинкой работало подразделение Horse, которое отвечает за двигатели внутреннего сгорания и является совместным предприятием Renault и Geely. В партнеры также привлечена известная испанская нефтехимическая компания Repsol. Цель работы понятна: снизить расход топлива и вредные выбросы в атмосферу, чтобы вписываться в средние требования ЕС. Мотор способен сократить выбросы примерно на 1,77 тонны CO<sub>2</sub> в год. В Repsol подчеркивают: 100 % возобновляемое топливо – это решение с нулевым уровнем выбросов, которое дополняет электромобили и помогает декарбонизировать транспорт [7].

В связи с обострившейся экологической обстановкой вернулись и к теме водяного впрыска, позволяющего снизить токсичность в выхлопных газах. И что особенно значимо, что данный способ не требует глубокой модернизации ДВС, а может быть внедрен на уже произведенных двигателях. Все чаще в печати появляются работы в этом направлении. Ученые Томского Политехнического Университета совместно с коллегами из Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии (ФИЦ ПХФ и МХ) РАН провели эксперименты и с высокой точностью предсказали кинетические характеристики воспламенения и сгорания топлива с добавлением воды. Результаты показали, что топливо с небольшой добавкой воды сгорает на 7-14 % быстрее по сравнению с однородным углеводородным топливом. В ходе экспериментов ученые установили, что добавление воды к жидкому углеводородному топливу не только ускоряет процесс его сгорания, но и способствует снижению эмиссии оксидов серы и азота в атмосферу. Т.е. вода может выступать в роли триггера быстрого и интенсивного сгорания углеводородного топлива.

Имеются работы по водяному впрыску ученых МАИ, также использованием впрыска воды в ДВС занимаются в «Белорусской государственной сельскохозяйственной академии». Это еще раз подтверждает, что исследования данного направления по модернизации ДВС с целью снижения токсичности выхлопных газов, является актуальной [8].

С целью практического исследования работы ДВС на смеси с водой была разработана лабораторная экспериментальная установка на базе 4-х тактного бензинового поршневого двигателя внутреннего сгорания (рисунок 1). Для того чтобы вода в цилиндры попадала в мелкодисперсном состоянии, был разработан узел по получению влажного насыщенного водяного пара (водяного тумана) [9, 10].

Было проведено ряд экспериментов. Во всех зафиксировано снижение уровня токсичных газов: окиси углерода (CO) порядка 5 %, двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>) порядка 5 %, углеводородов (СН) порядка 10 %. Полученные результаты вселяют уверенность в правильном выборе варианта решения задачи и необходимости дальнейшего более глубокого экспериментального исследования и математического описания процессов и результатов экспериментов [9-11].

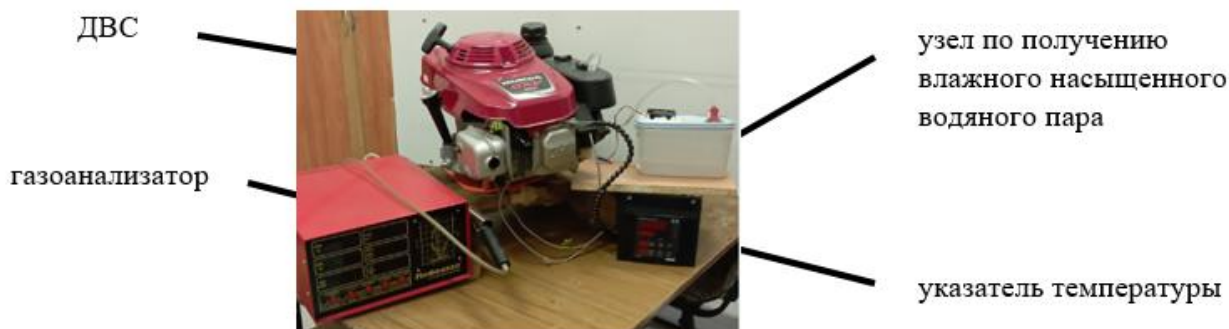


Рисунок 1 – Экспериментальная установка на базе 4-х тактного бензинового двигателя с узлом по получению влажного насыщенного водяного пара

С целью более глубокого исследования работы двигателя с впрыском воды рассматривается вопрос апробации метода на реальном автомобиле ВАЗ 2105 с инжекторным впрыском. Узел получения тумана располагается в подкапотном пространстве. Для его монтажа рассмотрена схема системы питания двигателя с распределительным впрыском автомобиля ВАЗ 2105 (рисунок 2).

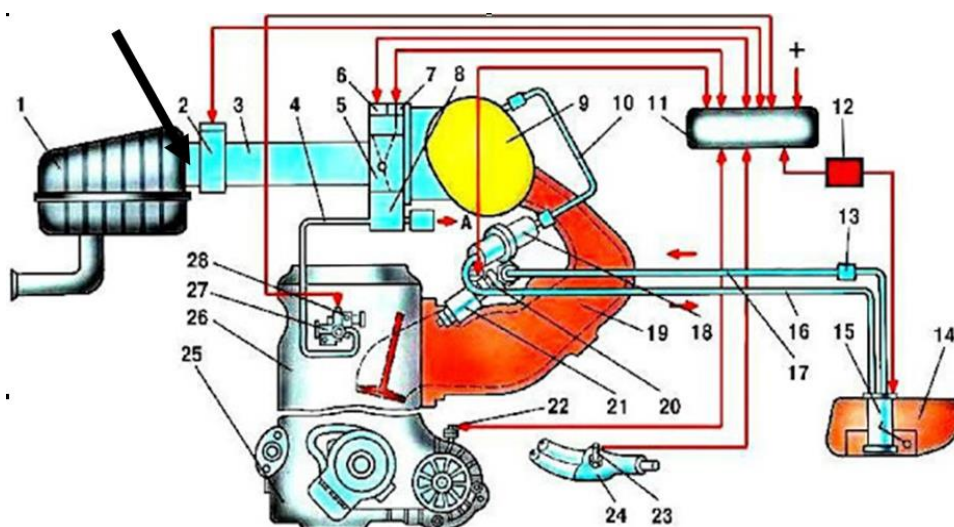


Рисунок 2 – Схема питания инжекторного двигателя ВАЗ 2105:

1 – воздушный фильтр; 2 – датчик массового расхода воздуха; 3 – шланг впускной трубы; 4 – шланг подвода охлаждающей жидкости; 5 – дроссельный патрубок; 6 – регулятор холостого хода; 7 – датчик положения дроссельной заслонки; 8 – канал подогрева системы холостого хода; 9 – ресивер; 10 – шланг регулятора давления; 11 – электронный блок управления; 12 – реле включения электробензонасоса; 13 – топливный фильтр; 14 – топливный бак; 15 – электробензонасос с датчиком уровня топлива; 16 – сливная магистраль; 17 – подающая магистраль; 18 – регулятор давления; 19 – впускная труба; 20 – рампа форсунок; 21 – форсунка; 22 – датчик скорости; 23 – датчик концентрации кислорода; 24 – приемная труба глушителя; 25 – коробка передач; 26 – головка цилиндров; 27 – выпускной патрубок системы охлаждения; 28 – датчик температуры охлаждающей жидкости

Система питания автомобиля ВАЗ 2105 предназначена для хранения запаса топлива, очистки топлива и воздуха от посторонних примесей, подачи воздуха и топлива в цилиндры двигателя автомобиля. Система питания инжекторного двигателя на автомобиле состоит из бензобака, бензонасоса с датчиком указателя уровня топлива, топливопроводов, топливного фильтра, топливной рампы с форсунками, воздушного фильтра, рукавов подвода воздуха, узла дроссельной заслонки с приводом, а также системы улавливания паров топлива. Воздух, поступающий в цилиндры инжекторного двигателя ВАЗ, очищается от пыли воздушным фильтром.

Подачу влажного насыщенного пара предполагается вводить в дроссельную заслонку в место выхода воздуха из воздушного фильтра перед датчиком расхода воздуха (показано стрелкой на рисунке 2). Топливо подается в топливную рампу (рисунок 3), представляющую собой полую планку с закрепленными на ней форсунками. Топливная рампа закреплена на впускном коллекторе трубопровода.

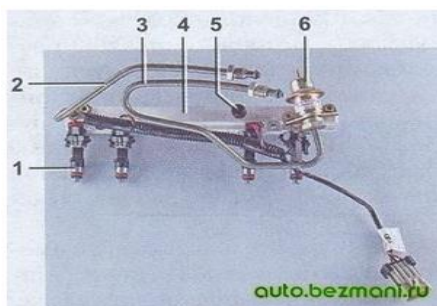


Рисунок 3 – Топливная рампа:

- 1 – форсунка; 2 – подводящая трубка; 3 – сливная трубка; 4 – топливная рампа; 5 – штуцер с золотниковым клапаном для проверки рабочего давления (закрит резьбовым колпачком);  
6 – регулятор давления топлива

Воздух подается в дроссельную заслонку из рукава подвода воздуха от воздухозаборника (рисунок 4).



Рисунок 4 – Дроссельная заслонка:

- 1 – штуцер для соединения с адсорбером; 2 – патрубок корпуса дроссельной заслонки;  
3 – дроссельная заслонка; 4 – сектор привода дроссельной заслонки; 5 – штуцер отвода картерных газов; 6 – штуцеры для соединения с системой охлаждения двигателя; 7 – датчик положения дроссельной заслонки; 8 – регулятор холостого хода

На фотографии подкапотного пространства экспериментального образца автомобиля (рисунок 5) показано место установки модуля производства влажного насыщенного пара 1 и место его ввода 2.

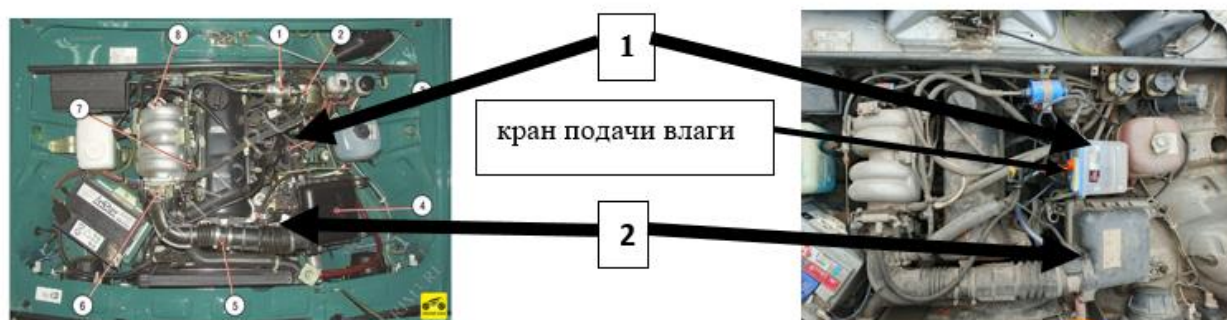


Рисунок 5 – Подкапотное пространство автомобиля ВАЗ 2105:

1 – топливный фильтр; 2 – топливопровод; 3 – адсорбер системы управления паров топлива; 4 – воздушный фильтр; 5 – воздухоподающий патрубок; 6 – дроссельный узел; 7 – топливная рампа с форсунками; 8 – регулятор давления топлива

В отличие от лабораторного образца (рисунок 1), в случае использования данного метода на реальном автомобиле ВАЗ 2105, в емкости с дистиллированной водой, предусмотрен клапан, предотвращающий попадание воды в выходной патрубок подачи тумана в воздухоподающий патрубок при движении и качки автомобиля. Клапан изготовлен в виде решетки с наклонными панелями, которые перекрывают друг друга (рисунок 6), и установлен в паровом пространстве перед трубкой забора влажного насыщенного водяного пара. При качке автомобиля на неровностях дороги вода будет плескаться, попадать на решетку и сливаться с наклонных панелей обратно.

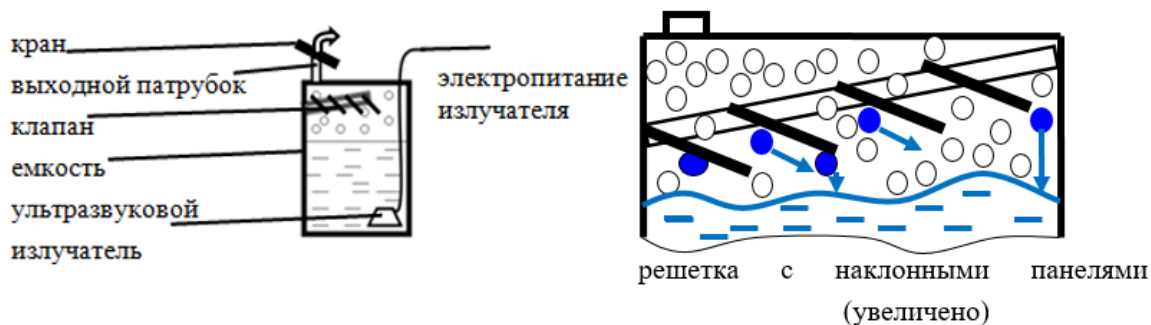


Рисунок 6 – Схема узла получения влажного насыщенного водяного пара и решетки с наклонными панелями (клапаном)

Для того чтобы вода, находящаяся в топливо-водо-воздушной смеси, не конденсировалась и не оставалась в цилиндрах после остановки двигателя, перед глушением двигателя необходимо закрыть кран патрубка подачи тумана из узла получения влажного водяного пара (на рисунке 5 показан кран). В настоящее время кран перекрывается вручную. Для этого, от крана в салон автомобиля протянут приводной тросик. После перекрытия крана

двигателю необходимо дать поработать несколько секунд для полного удаления влаги из цилиндров вместе с продуктами сгорания. В дальнейшем эти операции предусматривается автоматизировать, снабдив кран приводом, управляемым электронным блоком управления.

Подводя итог, с уверенностью можно сказать, что экспериментальные данные, полученные на реальном автомобиле, позволят приблизить внедрение данного способа впрыска воды, в первую очередь с целью снижения токсичности выхлопных газов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольшкіна, Д. В. Негативное воздействие автомобильного транспорта на экологию / Д. В. Кольшкіна, Д. Н. Айыдов, Л. Е. Куценко // Инновационная наука. – 2019. – №. 2. – Р. 36-37.
2. Автомобили и экология / ECO portal. – URL: <https://ecoportal.su/> (дата обращения: 24.02.2026).
3. Загрязнение атмосферы автотранспортом: как происходит и способы снижения. – URL: <https://rcycle.net/> (дата обращения: 18.02.2026).
4. РФ будет субсидировать от половины затрат при переводе автомобилей на метан / Интерфакс. – URL: <https://www.interfax.ru/> (дата обращения: 25.02.2026).
5. Дьяченко, Н. Х. Теория двигателей внутреннего сгорания. Рабочие процессы / Н. Х. Дьяченко. – Ленинград : Машиностроение, 1974. – 551 с.
6. Kawasaki выпустила первый в мире серийный ДВС, которые генерирует электроэнергию на газовой смеси с 30 % водорода / 3DNews. – URL: <https://3dnews.ru/> (дата обращения: 22.02.2026).
7. RENAULT и GEELY представили ДВС под 100 % возобновляемое топливо. – URL: <https://auto.mail.ru/> (дата обращения: 24.02.2026).
8. Перспективные добавки. Ученые ТПУ: добавление воды в топливо ускоряет его сгорание на 14 %. – URL: <https://news.tpu.ru/news/uchenyetpu-dobavlenie-vody-v-toplivo-uskoryaet-ego-sgoranie-na-14-/> (дата обращения: 20.02.2026).
9. Карнаухова, И. В. Влияние диссоциации воды на расход топлива в двигателях внутреннего сгорания / И. В. Карнаухова, В. Н. Карнаухов, Д. А. Захаров // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 352.
10. Разработка схемы экспериментальной установки ДВС с модернизированной системой подачи топливо-водо-воздушной смеси с целью снижения вредных выбросов в выхлопных газах / С. А. Толстов, С. Л. Панченко, А. С. Толстова, Д. Р. Набатов, Р. В. Трощенко // Физические основы наукоемких технологий в современном мире : Материалы Всероссийской научно-методической конференции с международным участием, посвящённой 80-летию со дня рождения профессора В.В. Постникова, приуроченной к 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 15 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 136-141.
11. Толстов, С. А. Снижение токсичности выхлопных газов цикла ДВС при работе на газопароводяной смеси / С. А. Толстов, С. Л. Панченко, А. С. Толстова // Воронежский научно-технический Вестник. – 2025. – Т. 3, № 3(53). – С. 82-95.

## REFERENCES

1. Kolyshkina, D. V. The Negative Impact of Road Transport on the Environment / D. V. Kolyshkina, D. N. Aydov, L. E. Kushchenko // Innovative Science. – 2019. – No. 2. – P. 36-37.
2. Cars and the Environment / ECO portal. – URL: <https://ecoportal.su/> (date of access: 24.02.2026).
3. Air Pollution from Road Transport: how it happens and how to reduce it. – URL: <https://rcycle.net/> (date of access: 18.02.2026).
4. The Russian Federation will subsidize half of the costs associated with converting vehicles to methane / Interfax. – URL: <https://www.interfax.ru/> (date of access: 25.02.2026).
5. Dyachenko, N. Kh. Theory of Internal Combustion Engines. Working Processes / N. Kh. Dyachenko. – Leningrad : Mashinostroenie, 1974. – 551 p.
6. Kawasaki has released the world's first serial internal combustion engine that generates electricity from a gas mixture with 30% hydrogen / 3DNews. – URL: <https://3dnews.ru/> (date of access: 22.02.2026).
7. RENAULT and GEELY have introduced an internal combustion engine that runs on 100 % renewable fuel. – URL: <https://auto.mail.ru/> (date of access: 24.02.2026).
8. Promising additives. TPU scientists: adding water to fuel accelerates its combustion by 14 %. – URL: <https://news.tpu.ru/news/uchenye-tpu-dobavlenie-vody-v-toplivo-uskoryaet-ego-sgoranie-na-14-/> (date of access: 20.02.2026).
9. Karnaukhova, I. V. Effect of dissociation of water to fuel consumption in internal combustion engines / I. V. Karnaukhova, V. N. Karnaukhov, D. A. Zakharov // Modern problems science and education. – 2015. – No. 1-1. – P. 352.
10. Development of a scheme for an experimental installation of an internal combustion engine with a modernized fuel-water-air mixture supply system in order to reduce harmful emissions in exhaust gases / S. A. Tolstov, S. L. Panchenko, A. S. Tolstova, D. R. Nabatov, R. V. Troshchenko // Physical foundations of high-tech technologies in the modern world : Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference with international participation dedicated to the 80th anniversary of the birth of Professor V.V. Postnikov, dedicated to the 95th anniversary of the VGLTU named after G.F. Morozov, Voronezh, April 15, 2025. – Voronezh : Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2025. – P. 136-141.
11. Tolstov, S. A. Reduction of toxicity of you-cotton gases of ice cycle when working on gas-steam-water mixture / S. A. Tolstov, S. L. Panchenko, A. S. Tolstova // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2025. – Vol. 3, No. 3(53). – P. 82-95.

## ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ЖИДКОСТИ

### EFFECT OF HEAT EXCHANGE PROCESS ON LIQUID CRYSTALLIZATION

**Ященко С.М.**, кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГКВБОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

**Yashchenko S.M.**, PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

**Аннотация.** Разработана математическая модель теплопроводности в системах с подвижной границей раздела, позволяющая: адекватно описать процесс теплообмена в условиях воздушного замораживания; рассчитать температурное поле и продолжительность процесса замораживания, определить количество вымороженной влаги, а также методику приближенного расчета времени замораживания. Отмечены преимущества сверхбыстрого замораживания. Полученные результаты использовали в технических расчетах. Экспериментальные исследования направлены на создание новых видов оборудования холодильной техники, их расчета и конструирования.

**Ключевые слова:** теплообмен, кристаллизация, температура, твердая и жидкая фаза.

**Abstract.** A mathematical model of thermal conductivity in systems with a movable interface has been developed, which allows: to adequately describe the heat exchange process under air freezing conditions; calculate the temperature field and the duration of the freezing process, determine the amount of frozen moisture, as well as the procedure for approximate calculation of the freezing time. The benefits of ultra-fast freezing are noted. The results obtained were used in technical calculations. Experimental studies are aimed at creating new types of refrigeration equipment, their calculation and design.

**Keywords:** thermal exchange, crystallization, temperature, solid and liquid phase.

При замораживании скорость замерзания зависит от размера продуктов, температуры паров хладагента и скорости его подачи. Если размеры или толщина слоя продуктов заданы, то скорость замерзания тем выше, чем ниже температура криогенных паров [1].

Снижение температуры испарения связано с увеличением мощности холодильных машин. Для обеспечения одинаковой интенсивности замораживания при низких температурах требуются машины более высокой мощности, чем при более высокой температуре. А это влечет за собой повышенный расход электроэнергии и, в конечном итоге повышает стоимость процесса замораживания [2].

Ускорить процесс замерзания можно и путем увеличения скорости циркуляции паров хладагента. Это влечет за собой рост коэффициента теплоотдачи от паров к продукту [3]. Чем

выше скорость паров, тем большим оказывается его подогрев. Для компенсации этого подогрева требуется дополнительная холодильная мощность. Таким образом, рост скорости циркуляции потока, имеет предел с точки зрения экономичности оборудования.

Задачу кристаллизации жидкости называют задачей о теплопроводности в системах с подвижной границей раздела. Модель исследования, оправдывающая это название задачи, произведено в представлении о движении грани раздела между отвердевшей и жидкой фазами от периферии в глубь тела по мере отвода тепла от его плоскости. Отвердевшую в этом процессе жидкость оценивают, как не подверженную свободному или же принужденному конвективному перемещению, в случае если она распределена в облике маленьких подключений в пористом жестком теле или же по-другому, механически связана с неподвижной скелетной структурой тела, а еще в случае если вязкость отвердевающей жидкости велика.

В общем случае неувязка решается с помощью задачи Стефана, сообразная условиям последовательной кристаллизации, имеет возможность быть сформулирована следующим образом. Существует сфера, занимающаяся новейшей фазой, сквозь которую исполняется теплоподвод. На плоскости раздела сосуществующих фаз сберегается температура их равновесия  $T_k$  и имеет место тепловой баланс между тепловым эффектом превращения и тепловыми потоками. Приняв конкретный закон теплопередачи в новой и старой фазе, а еще принимая во внимание краевые обстоятельства на плоскости всего рассматриваемого размера и исходную температуру системы, следует найти температурные поля в старой и новой фазе, а вслед за тем закон изменения размеров и формы области, занятой новой фазой.

Последовательная кристаллизация осуществляется в полупространстве  $x > 0$ , а на поверхности  $x = 0$  все время сохраняется температура  $T_n = \text{const}$ , меньшая  $T_k$ . Ясно, что в этом случае граница раздела фаз будет иметь координату  $x_0$ , определяемую выражением  $T(x_0, t) = T_k$ , и будет представлять собой плоскость, параллельную поверхности рассматриваемого объема  $x = 0$  ( $t$  – соответствующий момент времени) [4].

В описанном простейшем случае проблема Стефана формулируется следующим образом.

Имеется система, состоящая из твердой и жидкой фаз, которая занимает полупространство  $x > 0$ . Область  $0 < x < y(t)$  в данный момент времени  $t$  занята твердой фазой, а  $x > y(t)$  – жидкостью. В начальный момент твердая фаза отсутствует, т.е.  $y(t) = 0$ . Плоскость  $x = 0$  ограничивает систему снаружи. При  $t > 0$  эта плоскость имеет постоянную температуру  $T_n$ , меньшую  $T_k$ . Вдали от фронта кристаллизации ( $x \gg y(t)$ ) сохраняется начальная температура жидкости  $T_n > T_k$  (таким образом, считается, что жидкость перед началом охлаждения с поверхности  $x = 0$  перегрета).

Если считать, что теплоперенос в твердой и жидкой фазах осуществляется по закону Фурье, и не принимать во внимание температурную зависимость теплофизических характеристик сосуществующих сред, то температурное поле в каждой из фаз описывается следующими дифференциальными уравнениями в частных производных (ниже индексы «т» и «ж» относятся соответственно к твердой жидким фазам):

$$\frac{\partial^2 T_T}{\partial x^2} = \frac{1}{a_T} \frac{\partial T_T}{\partial t}; 0 < x < y(t)$$

$$\frac{\partial^2 T_{\text{ж}}}{\partial x^2} = \frac{1}{a_{\text{ж}}} \frac{\partial T_{\text{ж}}}{\partial t}; \quad y(t) < x < \infty, \quad (1)$$

где  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с.

В момент  $t = 0$  твердая фаза отсутствует, поэтому:

$$T_{\text{ж}}(x, 0) = T_H \quad \text{при } x > 0. \quad (2)$$

При  $x = 0$  сохраняется ( $t > 0$ ) температура, равная  $T_{\text{п}}$ :

$$T_T(0, t) = T_{\text{п}}. \quad (3)$$

Так как тепловой контакт на поверхности раздела фаз считается идеальным, при  $x = y(t)$  температуры жидкости и твердой фазы одинаковы и равны температуре равновесного сосуществования фаз:

$$T_{\text{ж}}[y(t), t] = T_T[y(t), t] = T_K. \quad (4)$$

Вдали от фронта кристаллизации сохраняется исходная температура:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} T_{\text{ж}}(x, t) = T_H. \quad (5)$$

На движущемся фронте фазового перехода выделяется скрытая теплота превращения, которая отводится через твердую фазу вместе с теплом перегрева.

$$\lambda_T \left( \frac{\partial T_T}{\partial x} \right)_{x=y(t)} = Q_0 \gamma \frac{dy}{dt} + \lambda_{\text{ж}} \left( \frac{\partial T_{\text{ж}}}{\partial x} \right)_{x=y(t)}, \quad (6)$$

где  $Q_0$  – скрытая теплота кристаллизации на единицу массы.

Выражение (6) – уравнение теплового баланса на фронте кристаллизации – служит для определения  $y(t)$ .

Из уравнений (1) и условий (2)-(6) находятся три неизвестные функции:  $T_T(x, t)$ ,  $T_{\text{ж}}(x, t)$  и  $y(t)$ . В рассматриваемом простейшем варианте задачи оказывается возможным получить решение в замкнутом виде. После подстановки новой переменной  $u = x / \sqrt{2t}$  в уравнение (1) и последующего нахождения общих решений получившихся уравнений и произвольных постоянных из условий (2)-(5) окончательно получаем:

$$T_T = T_{\text{п}} + (T_K - T_{\text{п}}) \frac{\text{erf}(u / \sqrt{2a_T})}{\text{erf}(\beta / \sqrt{2a_T})}$$

$$T_T = T_H - (T_H - T_K) \frac{\text{erfc}(u / \sqrt{2a_{\text{ж}}})}{\text{erfc}(\beta / \sqrt{2a_{\text{ж}}})}, \quad (7)$$

здесь принято  $y(t) = \beta / \sqrt{2t}$ ,  $\beta$  – постоянная величина.

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\eta^2} d\eta; \quad \text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x),$$

где  $\text{erf}(x)$  – табулированная функция. В переменных  $x$  и  $t$  выражения (7) имеют вид:

$$T_T = T_{II} + (T_K - T_{II}) \frac{\operatorname{erf}((x/2)\sqrt{a_T t})}{\operatorname{erf}(\beta/\sqrt{2a_T})}$$

$$T_T = T_H - (T_H - T_K) \frac{\operatorname{erfc}((x/2)\sqrt{a_{Ж} t})}{\operatorname{erfc}(\beta/\sqrt{2a_{Ж}})} . \quad (8)$$

Значение  $\beta$  определяется из трансцендентного уравнения, которое получается в результате подстановки (8) в (6).

Схематически распределение температур в системе твердое тело-жидкость представлено на рисунке 1.

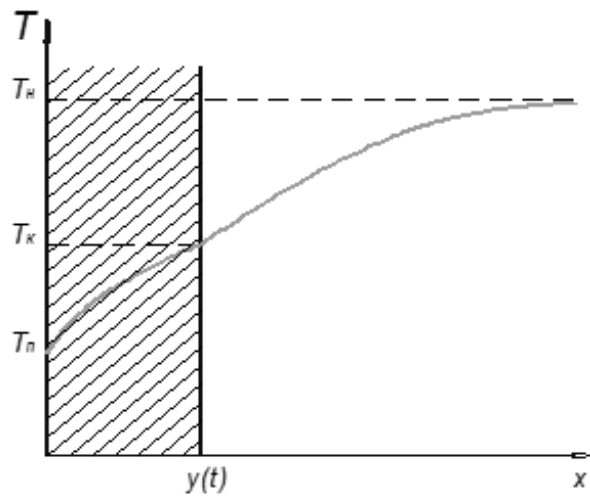


Рисунок 1 – Распределение температур в случае задачи Стефана в простейшей постановке: заштрихованная область – твердая фаза; при  $x > y(t)$  – жидкость

Однако данные рассуждения пригодны лишь для больших значений  $t$ , физическая необоснованность соотношения  $y(t) = \beta/\sqrt{2t}$  для малых значений  $t$  видна из следующих соображений. Из указанного соотношения следует:  $\frac{dy}{dt} = \frac{\beta}{\sqrt{2t}}$ . Таким образом, при  $t \rightarrow 0$  скорость перемещения фронта кристаллизации стремится к бесконечно большой величине, что нельзя согласовать с определенной конечной скоростью протекания собственно процесса кристаллизации. Это несоответствие является прямым следствием принятых при постановке задачи упрощений истинных условий кристаллизации.

В обобщенной постановке проблемы Стефана вместо требования равенства температуры на фронте кристаллизации температуре  $T_K$  вводится условие нормального роста кристалла:

$$\frac{dy}{dt} = K \Delta T , \quad (9)$$

где  $K$  – кинетический коэффициент, характеризующий скорость обмена атомами между твердой и жидкой фазами. При небольших значениях  $\Delta T$  в первом приближении можно

считать  $K = \text{const}$ .

Теперь искомыми функциями являются температурные поля в сосуществующих фазах, а также функции  $y(t)$  и  $\Delta T(t)$ . Если сохранить прежние краевые условия, то решение задачи уже нельзя получить в простом, замкнутом виде. Однако по крайней мере в двух случаях могут быть найдены решения указанной проблемы в простой, замкнутой форме [5]:

А. Рассмотрение одномерного роста кристалла на подложке при условии, что кинетика собственно процесса кристаллизации может считаться нормальной, а теплопередача в жидкой фазе описывается законом Фурье.

Б. Случай реализации ситуации, характеризуемый полным, интенсивным перемешиванием расплава, который находится при температуре кристаллизации и отдает тепло переохлажденной твердой фазе.

Приводимые ниже формулы, как и указанное выше решение проблемы Стефана в классической постановке, описывают процесс для не очень малых значений  $t$ .

В случае А (рисунок 2) кристалл растет от поверхности подложки, занимающей область  $x < 0$  и первоначально имеющей температуру  $T_0$ . В месте соприкосновения подложки с кристаллом имеется тепловое сопротивление равное  $1/H$ . Теплофизические характеристики твердой и жидкой фаз считаются постоянными, а на поверхности  $x = y(t)$  имеет место, кроме соотношения (9), условие теплового баланса (6).

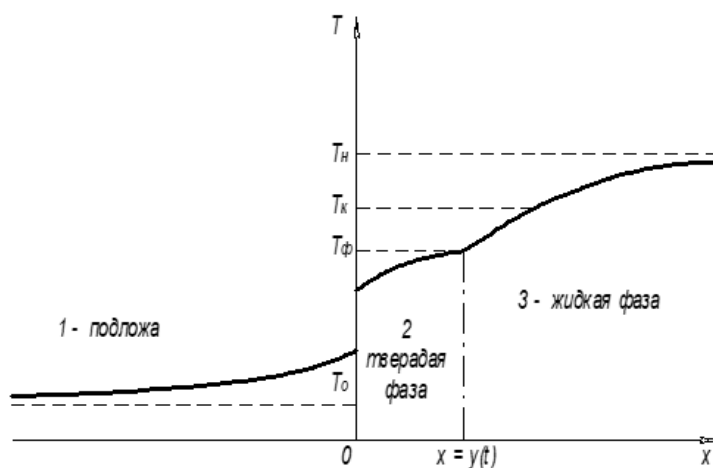


Рисунок 2 – Схематическое распределение температур при последовательной кристаллизации от поверхности подложки (случай А). На поверхности  $x = 0$  – неидеальный контакт с подложкой

На рисунке  $T_\phi$  температура на фронте кристаллизации. Математически задача формулируется следующим образом (ниже индекс 1 обозначает подложку, 2 – твердый кристалл, 3 – расплав). Теплопередача во всех трех сосуществующих средах описывается уравнением Фурье:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} = \frac{1}{a_i} \frac{\partial T_i}{\partial t}; \quad i = 1, 2, 3. \quad (10)$$

На поверхности соприкосновения подложки с растущим кристаллом отсутствуют тепловые источники и имеется тепловое сопротивление  $1/H$ . Следовательно,

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right)_{x=0} = \lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x=0} = H [T_2(0,t) - T_1(0,t)]. \quad (11)$$

На перемещающейся поверхности кристалла имеет место тепловой баланс и условие (9).

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\lambda_2}{Q_0 \gamma} \left[ \left( \frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x=y(t)} - \left( \frac{\partial T_3}{\partial x} \right)_{x=y(t)} \right] = K \Delta T. \quad (12)$$

Температуры твердой и жидкой фаз при  $x = y(t)$  равны и зависят от  $dy/dt$ :

$$T_2[y(t), t] = T_3[y(t), t] = T_K - \frac{1}{K} \frac{dy}{dt} = T_\Phi. \quad (13)$$

Вдали от фронта кристаллизации сохраняется начальная температура расплава:

$$T_3(\infty, t) = T_H > T_K. \quad (14)$$

Есть возможность удовлетворить всем перечисленным условиям, если исходить из решения уравнений (10) в форме:

$$T_i(x, t) = A_i + B_i \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{a_i t}} \right) + \frac{C_i}{2\sqrt{\pi a_i t}} e^{-x^2/4a_i t}; \quad i = 1, 2, 3. \quad (15)$$

В случае Б (рисунок 3) в жидкой фазе имеет место теплопередача путем интенсивной конвекции. Температура жидкой фазы равна  $T_K$ . От жидкой к твердой фазе осуществляется теплопередача при наличии теплового сопротивления на границе раздела фаз.

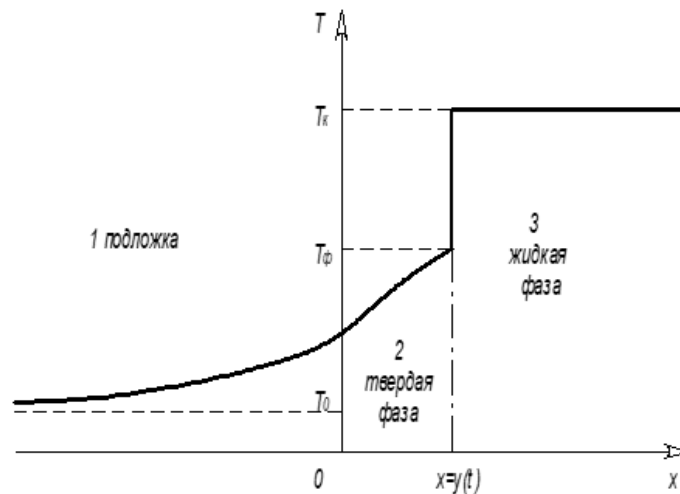


Рисунок 3 – Схематическое распределение температур при последовательной кристаллизации от поверхности подложки без перегрева. Идеальный контакт областей 1 и 2, интенсивное перемешивание

Идеальный контакт кристалла с подложкой осуществляется по плоскости  $x = 0$ , градиенты температур в жидкости отсутствуют. В этих условиях температурные поля в подложке (индекс 1) и кристалле (индекс 2) удовлетворяют уравнениям:

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = \frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1}{\partial t}; \quad \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = \frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2}{\partial t}. \quad (16)$$

На достаточно большом расстоянии от поверхности контакта с кристаллом ( $x = 0$ ) в подложке сохраняется исходная температура  $T_1(-\infty, t) = T_0$ .

Вследствие идеальности теплового контакта кристалла с подложкой имеем равенство  $T_1(0, t) = T_2(0, t)$ .

Отсутствие источников и стоков тепла при  $x = 0$  выражается соотношением:

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right)_{x=0} = \lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x=0}. \quad (17)$$

На фронте кристаллизации, как и в случае А имеем:

$$T_2[y(t), t] = T_\phi(t) = T_K - \frac{1}{K} \frac{dy}{dt}. \quad (18)$$

Тепловой поток от фронта кристаллизации через твердую фазу равен сумме, состоящей из члена, обусловленного скрытой теплотой превращения, и слагаемого, выражающего теплопередачу от расплава к твердой фазе:

$$\lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x=y(t)} = Q_0 \gamma \frac{dy}{dt} + D [T_K - T_\phi(t)] = \left( Q_0 \gamma + \frac{D}{K} \right) \frac{dy}{dt}, \quad (19)$$

где  $D$  – коэффициент интенсивности отдачи тепла от жидкой фазы к внутренней поверхности твердой фазы, а в качестве теплоты превращения на единицу массы входит величина:

$$Q_{\phi} = Q_0 + \frac{D}{\gamma K}. \quad (20)$$

Из решений задачи следует:  $y(t) = 2\beta_1 \sqrt{t}$ , где  $\beta_1$  – постоянная величина. Значение  $\beta_1$  зависит от величины  $Q_{\phi}$ .

Решения уравнений (16) находятся в виде:

$$T_i(x, t) = A_i + B_i \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{a_i t}} \right) + \frac{C_i}{2\sqrt{\pi a_i t}} e^{-x^2/4a_i t} + \frac{D_i e^{-x^2/4a_i t}}{2\sqrt{\pi a_i t}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{\pi a_i t}}} e^{\eta^2} d\eta \quad ; \quad i = 1, 2. \quad (21)$$

Но в проблеме Стефана о перемещении пределов фазового перехода считается, что процедура кристаллизации проходит при наличии стабильной температуры (ступень фазового перехода). На границе разделения фаз значения теплофизических характеристик (теплопроводность, теплоемкость, удельное противодавление) изменяются скачком. Передвижение пределов разделения фаз согласно направленности нормали к данной плоскости в единицу периода именуют темп замораживания; согласно ее величине возможно оценивать насыщенность движения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яценко, С. М. Исследование продолжительности процесса замораживания и распределения температуры по толщине тестовой заготовки при разработке экономически

оправданной технологии / С. М. Яценко, В. В. Кузнецова // Экономика. Инновации. Управление качеством. – 2017. – № 1(18). – С. 44-45.

2. Яценко, С. М. Инновационная технология сверхбыстрого замораживания тестовых заготовок / С. М. Яценко, В. В. Кузнецова, А. А. Саввин // Стандартизация, управление качеством и обеспечение информационной безопасности в перерабатывающих отраслях АПК и машиностроении : Материалы Международной научной-технической конференции, Воронеж, 09 декабря 2015 года. – Воронеж : Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2015. – С. 246-247.

3. Яценко, С. М. Интенсификация процесса сверхбыстрого замораживания тестовых заготовок / С. М. Яценко, В. В. Кузнецова, А. А. Саввин // Системный анализ и моделирование процессов управления качеством в инновационном развитии агропромышленного комплекса : Материалы II Международной научно-практической конференции, Воронеж, 05 апреля 2016 года. – Воронеж : Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2016. – С. 248-249.

4. Кретов, И. Т. О производстве хлебобулочных изделий из замороженных тестовых полуфабрикатов / И. Т. Кретов, А. М. Барбашин, В. В. Пойманов // Хлебопечение России. – 2001. – №2. – С. 17-20.

5. Богатырев, А. Н. Консервирование холодом / А. Н. Богатырев, В. Е. Куцакова. – Новосибирск, 1992. – 162 с.

## REFERENCES

1. Yashchenko, S. M. Research of the duration of the freezing process and the distribution of temperature along the thickness of the dough piece in the development of economically justified technology / S. M. Yashchenko, V. V. Kuznetsova // Economics. Innovations. Quality Management. – 2017. – No. 1(18). – P. 44-45.

2. Yashchenko, S. M. Innovative technology of ultra-fast freezing of dough pieces / S. M. Yashchenko, V. V. Kuznetsova, A. A. Savvin // Standardization, Quality Management, and Information Security in the Processing Industries of the Agro-Industrial Complex and Mechanical Engineering: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Voronezh, December 9, 2015. – Voronezh : Voronezh State University of Engineering Technologies, 2015. – P. 246-247.

3. Yashchenko, S. M. Intensification of the process of ultra-rapid freezing of dough pieces / S. M. Yashchenko, V. V. Kuznetsova, A. A. Savvin // System Analysis and Modeling of Quality Management Processes in the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex : Materials of the II International Scientific and Practical Conference, Voronezh, April 05, 2016. – Voronezh : Voronezh State University of Engineering Technologies, 2016. – P. 248-249.

4. Kretov, I. T. On the production of bakery products from frozen dough semi-finished products / I. T. Kretov, A. M. Barbashin, V. V. Poimanov // Russian Bakery. – 2001. – No. 2. – P. 17-20.

5. Bogatyrev, A. N. Cold Preservation / A. N. Bogatyrev, V. E. Kutsakova. – Novosibirsk, 1992. – 162 p.

Научное издание

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Материалы Национальной научно-практической конференции

Воронеж, 18 марта 2026 г.

Ответственный редактор С.В. Внукова

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано к изданию 15.05.2026. Объем данных 9,42 Мб  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова»  
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8