



ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Материалы Всероссийской научно-методической конференции

Воронеж, 17 апреля 2024 г.

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

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Материалы Всероссийской научно-методической конференции

Воронеж, 17 апреля 2024 г.

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

PHYSICAL BASIS OF SCIENCE-INTENSIVE TECHNOLOGIES

Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference

Voronezh, April 17, 2024

Voronezh 2024

Ф50 Физические основы наукоемких технологий : материалы Всероссийской научно-методической конференции, Воронеж, 17 апреля 2024 г. / отв. ред. Н. Ю. Евсикова ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2024. – 162 с. – URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2024/vserossijskaya-nauchno-metodicheskaya-konferenciya-fizicheskie-osnovy-naukоеmkih-tehnologij/> – Текст : электронный.

ISBN 978-5-7994-1136-7

В сборнике представлены материалы Всероссийской научно-методической конференции «Физические основы наукоемких технологий», которая прошла 17 апреля 2024 года на базе машиностроительного факультета ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». Цель конференции – ознакомление с результатами научной работы ученых, преподавателей и обучающихся, обмен знаниями и опытом по применению фундаментальных физических законов и методов, компьютерного моделирования и системного анализа для решения задач в научно-технических, технологических и других сферах, рассмотрение методических вопросов преподавания физики и общетехнических дисциплин, установление научных и образовательных контактов, привлечение студентов к научным исследованиям, повышение мотивации обучающихся к более глубокому изучению физики. Представленные работы посвящены актуальным проблемам ядерной физики, вопросам экологической термодинамики, создания приборов для диагностики жизненного состояния деревьев, применению формализованного моделирования и методов системного анализа для описания различных процессов, методическим аспектам преподавания физики.

Материалы конференции предназначены для широкого круга специалистов, научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений, интересующихся вопросами физико-математического моделирования процессов в естественных и технических системах и применением физических методов исследования в различных сферах науки и техники.

УДК 53

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ	5
Лисицын В.И., Матвеев Н.Н., Евсикова Н.Ю. СОДЕРЖАНИЕ ДЕТРИТА В ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЯХ.....	5
Матвеев Н.Н., Камалова Н.С., Евсикова Н.Ю., Лисицын В.И., Крутских Ю.В., Хворых А.М. К ВОПРОСУ О ТЕРМОДИНАМИКЕ ПРОЦЕССА ПОЛЯРИЗАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ В НЕОДНОРОДНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ.....	10
Отводенко Я.О., Кадменский С.Г. ВИРТУАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ПОЯВЛЕНИЯ ТРЕТЬИХ ЛЕГКИХ ПРЕДРАЗРЫВНЫХ ЯДЕР В ТРОЙНОМ СПОНТАННОМ И ВЫНУЖДЕННОМ ДЕЛЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР.....	17
Панченко С.Л. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННИКА-ГАЗИФИКАТОРА ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	27
Кумицкий Б.М., Евсикова Н.Ю., Саврасова Н.А. ИСТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ИЗ ДОННОГО РЕГУЛИРУЕМОГО ОТВЕРСТИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА.....	36
Омороков Д.Б., Евсикова Н.Ю. МОРФОЛОГИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАНОКЛАСТЕРОВ НИКЕЛЯ В ЛАТЕНТНЫХ ТРЕКАХ.....	44
Медведев Д.Ю., Дручинин Д.Ю. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАБОТЫ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ФРЕЗ.....	49
Кочетова Ж.Ю., Шишкин А.В., Внукова С.В., Тронин А.Л. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБЛАКА АММИАКА ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТРУБОПРОВОДА.....	56
Панюшкин А.Н., Панюшкин Н.Н., Бирюкова И.П. ЛОКАЛЬНАЯ ДОЗОВАЯ НАГРУЗКА ОТ ПЛОСКОЙ ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ ЗАЩИТЫ В ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКЕ.....	63
Кольчев С.А., Камалова Н.С. ОБ ОДНОМ РАСПРОСТРАНЁННОМ ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ.....	69
Секция 2. ТЕХНОЛОГИИ. НАУКА. МОЛОДЕЖЬ	75
Писклюков А.А., Любашевский Д.Е., Кострюков П.В. ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ КОРРЕЛЯЦИИ СПИНОВ ДВОЙНОГО ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР.....	75

Федорова О.А. АНАЛИЗ КОМПОНОВКИ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО И ПЛАНОВОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ РЕАКТОРА.....	84
Жуков Д.С., Швецов А.Н. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РОБОТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА.....	90
Серова Н.Е., Киселев А.М., Михайловская А.П. КРАШЕНИЕ ХЛОПКОЛАВСАНОВОЙ ТКАНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ АММОНИЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	98
Богданов Д.С., Евсиков И.Д., Попикова А.В., Полумиско А.А., Попиков С.К., Путятин П.А. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА МАНИПУЛЯТОРА СОРТИМЕНТОВОЗА С ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИМ ДЕМПФЕРОМ.....	109
Князев А.Г., Драпалюк М.В., Попиков П.И., Усков В.И., Гончаров Д.А., Орел Е.М. КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ЛЕСНОГО ДИСКОВОГО ПЛУГА С ГИДРОПРИВОДОМ ЗАДНИХ ВЫРЕЗНЫХ ДИСКОВ ПРИ ПОЛОСНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОЧВЫ НА ВЫРУБКАХ.....	114
Дерепаско И.В., Четверикова И.В., Красникова А.Ю. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БЕСЧОКЕРНОГО ЗАХВАТА С ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМ ГИДРОПРИВОДОМ.....	120
Нагайцев В.М., Терехина И.В., Камалова Н.С., Евсикова Н.Ю. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОДВЕСОК ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИМИ УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.....	128
Секция 3. СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	135
Бович В.Я., Кашинцева О.А. НОВИЗНА КУРСОВ ПО ВЫБОРУ, ОСВЕЩАЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА, ДЛЯ УЧАЩИХСЯ ПО ПРОГРАММАМ СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	135
Бирюкова И.П., Саврасова Н.А., Кузьмин А.Н. РАЦИОНАЛИЗАТОРСКАЯ РАБОТА В НАУЧНОЙ И УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КУРСАНТОВ.....	143
Камалова Н.С., Матвеев Н.Н., Евсикова Н.Ю., Внукова С.В., Агафонова М.В. К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОТИВАЦИОННОЙ НАСТРОЕННОСТИ ГРУППЫ ПРИ ОСВОЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ФИЗИКА».....	148
Камалова Н.С., Лисицын В.И., Евсикова Н.Ю., Майорова Т.Л., Ефанова Н.Д. РОЛЬ КЕЙС-ЗАДАНИЙ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ.....	156

Секция 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

DOI:10.58168/PBST_5-9

УДК 331

СОДЕРЖАНИЕ ДЕТРИТА В ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЯХ

DETRITUS CONTENT IN WOODY PLANTS

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

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

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. 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

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

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

Аннотация. Древесный детрит в обычном понимании содержит древесные остатки, сохранившие на данный момент, как правило, отдельные части формы дерева и состоящие из сухостоя, валежа, пней, сухих ветвей живых деревьев, отмерших корней, а также остатков, погребенных в почвенной толще. Это важная с экологической точки зрения составляющая древостоя влияет на биоразнообразие видов в лесной экосистеме. Существует эксергетический взгляд на понятие детрита, как некий эталонный уровень при расчете эксергии экосистемы. Эксергия отражает степень развития или сложности экосистемы, ориентируясь на весовые коэффициенты. Поэтому очень важно энергетическое содержание детрита. Традиционно для органических веществ оно принимается равным 18,7 кДж/г. В представленной работе предпринята попытка получить энергетическое содержание детрита на основе теплотворной способности древесины. На примере соснового древостоя показано, что удельную эксергию можно получить альтернативным способом по отношению к традиционным методам, в которых на основе информационного содержания генома, выраженного в течение жизненного цикла организма, рассчитывается весовой коэффициент эксергии.

Ключевые слова: детрит, эксергия, лесная экосистема, весовой коэффициент, древостой.

Abstract. In the conventional sense, woody detritus contains woody remains, which usually retain some parts of the tree form and consist of snags, logs, stumps, dry branches of living trees,

dead roots, as well as remains buried in the soil stratum. This is an ecologically important component of the forest stand, influencing the biodiversity of species in the forest ecosystem. However, there is an exergetic view of the concept of detritus as a kind of reference level in calculating ecosystem exergy. The exergy reflects the degree of development or complexity of the ecosystem centered on the exergy weighting factor. In this case, the energy content of detritus is important. Traditionally, for organic matter, it is assumed to be 18.7 kJ/g. In the presented work, an attempt has made to obtain the energy content of detritus based on the calorific value of wood. Using the example of a pine stand, it has shown that specific exergy can be obtained by the way that is alternative to traditional methods, where the exergy weighting factor is calculated based on the information content of the genome expressed during the life cycle of the organism.

Keywords: detritus, exergy, forest ecosystem, weight coefficient, forest stand.

Древесный детрит традиционно рассматривается как важная компонента лесных экосистем. Он является весомой составляющей биоразнообразия, и продукты его разложения не только способствуют возобновлению для ряда важных пород, но также служат источником питательных веществ в почву и углекислого газа в атмосферу. Общепринятой классификации древесного детрита в настоящее время не существует. К детриту относят, как правило, древесные остатки, которые сохранили «на момент учёта свою морфологическую форму и состоящие из сухостоя, валежа, пней, сухих ветвей живых деревьев, отмерших корней, а также остатков, погребенных в почвенной толще» [1]. Вопросы научного лесопользования затрагивают не только установление объемов детрита, необходимых для успешного лесовосстановления, но и изучение влияния детрита на микроклимат, в том числе как водосодержащий элемент, и запасы количества углерода в почве. В настоящее время этим проблемам посвящены, в частности, публикации, в которых рассмотрены: движение к новой парадигме управления древесным детритом [2]; значение древесного детрита как одного из элементов круговорота углерода лесных биогеоценозов [3]; роль биоразлагающих организмов в разрушении детрита в мангровых лесах Индонезии [4]. В перечисленных работах представлен взгляд на детрит как на составляющую экосистемы, которая находится в состоянии распада, и для оценок используются данные по объему детрита. Таким образом, детрит является важной составляющей экосистем, которая особенно необходима при эксергетическом взгляде на их функционирование.

Как известно, экосистемы обладают огромной сложностью, что делает невозможным анализ всех деталей. Для отражения глобальных свойств экосистемы представляется подходящим статистический термодинамический подход. Сложность дает экосистеме возможность выбирать направление развития шаг за шагом, самоорганизуя свою структуру в соответствии с внешними изменениями. В экологической термодинамике такая возможность выбора описывается с помощью функции цели, зависящей от переменных состояния, которые опять же зависят от вынуждающих функций и параметров. В современной экологии в качестве такой функции цели предлагается использовать эксергию, которая помимо свободной энергии биомассы, как топлива, учитывает информацию, воплощенную в структуре биомассы [5, 6]. С термодинамической точки зрения, эксергия – это количество работы, которую система может выполнить, будучи приведенной в равновесие с окружающей средой. Эксергия пытается

учесть фактическую свободную энергию биомассы, включая свободную энергию, хранящуюся в информации.

Разные организмы могут иметь различные стратегии для получения определенного уровня эксергии. Например, у растения, растущего в тени, будут более крупные листья и/или более высокая концентрация хлорофилла, чтобы иметь возможность получить ту же свободную энергию, что и растение, растущее при полном солнечном свете. Эти два растения будут иметь приблизительно одинаковую эксергию, т.е. обладать одинаковым количеством (свободной) энергии на единицу биомассы. Поэтому эксергия является теоретически правильным выражением фактора качества энергии, накопленной в экосистеме.

Использование целевой функции эксергии имеет то преимущество, что она является мерой выживания, поскольку учитывает удаленность от термодинамического равновесия, обусловленную содержанием биомассы и информации. Выживание экосистем – это вопрос многих различных видов, и поэтому было бы естественно учитывать информацию, воплощенную в различных видах, в дополнение к химической энергии, содержащейся в биомассе. Эксергия – это термодинамическая функция, а не переменная состояния, потому что она зависит от состояния окружающей среды. Эксергия, как максимальная работа, должна быть положительна и иметь единицы энергии [5, 6]. Эксергия может быть определена как

$$Ex = T_0(S_0 - S), \quad (1)$$

где T_0 – абсолютная температура окружающей среды; S_0 – энтропия среды, рассматриваемая в состоянии термодинамического равновесия; S – энтропия экосистемы.

Расчет эксергии по формуле (1) невозможен, так как не известны значения энтропии среды S_0 и энтропии экосистемы S . Датским экологом С.Е. Йоргенсенем (S.E. Jorgensen) разработана теория расчета эксергии, которая использует значения химического потенциала мертвого органического вещества [7]. С экологической точки зрения, смесь соответствующих ингредиентов этого органического вещества (т.е. составляющих его углеводов, жиров и белков) представляет собой детрит. Значения химического потенциала для такой смеси известны. Определить величину эталонного уровня является проблемой референтного уровня, выбранного для экосистемы. Одно из очевидных решений – выбрать исходный уровень экосистемы равным детриту, то есть рассматривать детрит как конечную и начальную точку всей органической материи. Большая часть (мёртвого) органического вещества имеет содержание энергии примерно 18,7 кДж/г, которое и применяется для обозначения эталонного уровня при расчетах эксергии, но возможно и другое значение для использования в формулировке эталонного уровня [2]. В данной работе предлагается в качестве такого эталонного уровня применять содержание тепловой энергии определенного количества сухой древесины.

Таким образом, цель представленной работы – определить энергетическое содержание детрита на основе теплотворной способности древесины на примере соснового древостоя.

Оценим значение теплосодержания для соснового древостоя, исходя из значения теплотворности r – объёмной удельной теплоты сгорания. Согласно [8] при 20% влажности она равна $r_v = (5368 \div 8918)$ кДж/дм³ или МДж/м³.

Плотность древесины сосны ρ в зависимости от влажности находим из Приложения 2 «Единицы измерения количества лесоматериалов» к приказу Минтранса РФ №89 от 13.08.97 г.

[9]. Для сосны свежесрубленной $\rho_{св} = 820 \text{ кг/м}^3$, а при 20% влажности $\rho_{20\%} = 520 \text{ кг/м}^3$. Относительный коэффициент равен $\rho_{20\%}/\rho_{св} = 0,634$. Т.е. из 1000 кг свежесрубленной сосны мы получим 634 кг высушенной до 20 % влажности древесины сосны.

Переведем объёмную теплотворность древесины сосны r_v при 20% влажности в массовую r_m

$$r_v = Q/V, r_m = Q/m_{20\%} = Q/(\rho_{20\%}V) = r_v/\rho_{20\%}. \quad (2)$$

Тогда теплотворность древесины сосны при 20% влажности будет равна

$$r_m(20\%) = (5368 \div 8918)/0,52 \text{ кДж/кг} = (10323 \div 17146) \text{ кДж/кг}, \quad (3)$$

а тепло, которое можно получить при сжигании 1 кг свежесрубленной сосны оценится как

$$r_m = (6546 \div 10873) \text{ кДж/кг} \text{ или } (6,546 \div 10,873) \text{ кДж/г}, \quad (4)$$

что, конечно, меньше общепринятого значения теплосодержания детрита 18,7 кДж/г. Это вполне объяснимо, так как в нашем расчете мы руководствовались значением массы свежесрубленной древесины.

Расчеты удельной эксергии для растительного покрова, приведенные в [4], дают для весового коэффициента β интервал значений $\beta_i = (30 \div 90)$, учитывая который, приходим к следующей оценке для эксергии соснового древостоя:

$$Ex_{spec} = \beta_i r_m, Ex_{spec} = (196,38 \div 910,87) \text{ кДж/г}. \quad (5)$$

В заключение отметим, что приведенная оценка эксергии (5) показывает необходимость для получения более точного интервала значений проведения дополнительных исследований, включающих способы расчета производства энтропии для лесных массивов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швиденко, А.З. Оценка запасов древесного детрита в лесах России / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепаченко, С. Нильссон // Лесная таксация и лесоустройство. – 2009. – № 1 (41). – С. 133-147.
2. Harmon, M.E. Moving towards a New Paradigm for Woody Detritus Management / M.E. Harmon. – USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-181, 2002. – P. 929-944. – URL: https://www.fs.usda.gov/psw/publications/documents/psw_gtr181/071_Harm.pdf.
3. Вайс, А.А. Запас сухостоя в пихтово-еловых насаждениях предгорной части Восточного Саяна / А.А. Вайс, Е.А. Ануев, А.В. Шишмарёва // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 7. – С. 5-11. – URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37655>.
4. Biodegraders of Large Woody Debris Across a Tidal Gradient in an Front / I.W. Hendy, J.R. Shipway, M. Tupper, A.G. Etxabe, R.D. Ward, S.M. Cragg // Frontiers in Forests and Global Change. – 2022. – Vol. 5. – Art. No. 852217. – doi: 10.3389/ffgc.2022.852217.
5. Thermodynamics in Ecology – An Introductory Review / S.N. Nielsen, F. Müller, J.C. Marques, S. Bastianoni, S.E. Jørgensen // Entropy. – 2020. – Vol. 22, No. 8. – Art. No. 820. – <https://doi.org/10.3390/e22080820>.
6. Лисицын, В.И. Эксергия как экологический фактор оценки качества лесных экосистем / В.И. Лисицын, Н.Н. Матвеев, Н.Ю. Евсикова // Физические основы современных наукоемких технологий : Материалы Международного научно-методического семинара, посвященного 100-летию со дня рождения профессора А.Л. Гутмана, Воронеж, 25 октября 2022 года / отв. ред. Н.Ю. Евсикова. – Воронеж, 2022. – С. 16-21. – DOI 10.58168/ALGutman2022_16-21.

7. Bendoricchio, G. Exergy as goal function of ecosystems dynamic / G. Bendoricchio, S.E. Jørgensen // *Ecological Modelling*. 1997. – Vol. 102. – P. 5–15.

8. Инженерный справочник. Таблицы DPVA.ru – URL: <https://dpva.xyz/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/ComnustionEnergy/Woo dWetDryCombustion/>.

9. Приказ Минтранса РФ от 13.08.1997 N 94 Об утверждении и введении в действие Правил безопасности морской перевозки лесных грузов (вместе с РД 31.11.21.01-97 ...). Приложение 2. Единицы измерения количества лесоматериалов. – URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-mintransa-rf-ot-13081997-n-94/>.

REFERENCES

1. Shvidenko, A.Z. Assessment of wood detritus reserves in Russian forests / A.Z. Shvidenko, D.G. Shchepaschenko, S. Nilsson // *Forest taxation and forest management*. – 2009. – No. 1 (41). – P. 133-147.

2. Harmon, M.E. Moving towards a New Paradigm for Woody Detritus Management / M.E. Harmon. – USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-181, 2002. – P. 929-944. – URL: https://www.fs.usda.gov/psw/publications/documents/psw_gtr181/071_Harm.pdf.

3. Weiss, A.A. The supply of dead wood in fir-spruce plantations in the foothills of the Eastern Sayan / A.A. Weiss, E.A. Anuev, A.V. Shishmareva // *Advances in modern natural science*. – 2021. – No. 7. – P. 5-11. – URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37655>.

4. Biodegraders of Large Woody Debris Across a Tidal Gradient in an Front / I.W. Hendy, J.R. Shipway, M. Tupper, A.G. Etxabe, R.D. Ward, S.M. Cragg // *Frontiers in Forests and Global Change*. – 2022. – Vol. 5. – Art. No. 852217. – doi: 10.3389/ffgc.2022.852217.

5. Thermodynamics in Ecology – An Introductory Review / S.N. Nielsen, F. Müller, J.C. Marques, S. Bastianoni, S.E. Jørgensen // *Entropy*. – 2020. – Vol. 22, No. 8. – Art. No. 820. – <https://doi.org/10.3390/e22080820>.

6. Lisitsyn, V.I. Exergy as an ecological factor for assessing the quality of forest ecosystems / V.I. Lisitsyn, N.N. Matveev, N.Yu. Evsikova // *Physical foundations of modern science-intensive technologies: Materials of the International scientific and methodological seminar dedicated to the 100th anniversary of the birth of Professor A.L. Gutman, Voronezh, October 25, 2022 / Rep. editor N.Yu. Evsikova*. – Voronezh: Voronezh State Forestry University named after. G.F. Morozova, 2022. – P. 16-21. – DOI 10.58168/ALGutman2022_16-21.

7. Bendoricchio, G. Exergy as goal function of ecosystems dynamic / G. Bendoricchio, S.E. Jørgensen // *Ecological Modelling*. 1997. – Vol. 102. – P. 5–15.

8. Engineering reference book. Tables DPVA.ru – URL: <https://dpva.xyz/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/ComnustionEnergy/Woo dWetDryCombustion/>.

9. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated August 13, 1997 N 94 On the approval and implementation of the Safety Rules for the maritime transportation of timber cargo (together with RD 31.11.21.01-97...). Appendix 2. Units for measuring the quantity of timber. – URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-mintransa-rf-ot-13081997-n-94/>.

К ВОПРОСУ О ТЕРМОДИНАМИКЕ ПРОЦЕССА ПОЛЯРИЗАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ В НЕОДНОРОДНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

ON THE QUESTION OF THE WOOD POLARIZATION PROCESS THERMODYNAMICS IN NONHOMOGENEOUS TEMPERATURE FIELD

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

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

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

Крутских Ю.В., преподаватель СПО, аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Хворых А.М., преподаватель СПО, студент 2 курса магистратуры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. 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

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

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

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

Krutskikh Yu.V., college teacher, postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Khvorykh A.M., college teacher, 2nd year master's student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Понимание механизма формирования разности потенциалов в древесине в неоднородном температурном поле является концептуальной основой для моделирования динамики поляризации в композитах природного происхождения. В статье в рамках термодинамического подхода обоснована динамика процесса поляризации в тонком слое древесины в неоднородном температурном поле с формированием устойчивой разности потенциалов.

Ключевые слова: перераспределение зарядов, разность потенциалов, поляризация, полимерные композиты, древесина, термодинамический подход.

Abstract. Understanding the mechanism of potential difference formation in wood in a non-uniform temperature field is the conceptual basis for modeling the dynamics of polarization in composites of natural origin. In the article, within the framework of the thermodynamic approach, the dynamics of the polarization process in a thin layer of wood in a non-uniform temperature field with the formation of a stable potential difference has substantiated.

Keywords: charge redistribution, potential difference, polarization, polymer composites, wood, thermodynamic approach.

Фундаментальные научные исследования лежат в основе инновационного подхода и являются необходимым условием реального технологического прорыва [1]. Современная научная работа наиболее активно ведется в области комплексных проблем, затрагивающих различные направления. Все чаще решения и концепции формируются на «стыке» наук [2]. Среди современных материалов, используемых в разных отраслях экономики, преобладают сложные композиты, в том числе и природного происхождения [3]. В области прогноза экологической ситуации, определяющей условия существования людей, большое значение приобретает понимание процессов обмена влагой в системе «земля-атмосфера» [4], которое также связано с перераспределением ионов солей в зрелой древесине стволов деревьев. Методы мониторинга окружающей среды с контролируемой точностью и несущественным влиянием на состояние деревьев могут быть разработаны на базе электроизмерительных приборов, принцип действия которых основан на механизме перераспределения зарядов ионов солей в органах растений под влиянием факторов окружающей среды [5]. Таким образом, в настоящий момент актуальны исследования сложных полиморфных объектов природного происхождения.

Полимерные композиты имеют сложную внутреннюю структуру, поэтому под внешним воздействием (изменение температуры окружающей среды, обработка физическими полями) в них инициируются процессы, динамика которых определяется не только влиянием извне, но и особенностями их микроструктуры (наличием физических сеток, углеводородных матриц, компоновки элементов макромолекул и т.д.). Например, основными составляющими древесины являются лигнин и целлюлоза, находящаяся в аморфной и кристаллической фазе, сингония которой неоднозначна и зависит от породы дерева. В большинстве случаев (модель Мейера-Миша [2, 3]) рассматривается кристаллическая решетка целлюлозы-I имеющая моноклинную сингонию с параметрами: $a = 8,17 \text{ \AA}$, $b = 10,30 \text{ \AA}$, $c = 7,84 \text{ \AA}$ и $\beta = 84^\circ$. В процессе моделирования элементарную ячейку представляют набором параллельных винтовых осей вдоль направления b (см. рис. 1) и полагают, что половина молекулярных цепей, проходящих вдоль каждого из четырех ребер ячейки и по вертикальной центральной оси, направлена в одну сторону (черные кружки на рис. 1), а вторая – в противоположную. С другой стороны, древесина является пористой гетероструктурой, а формирование лингоуглеводной матрицы (см. рис. 2) её вещества уникально для каждого дерева. Многофазность компонент обуславливает уникальные свойства этого природного композита, поэтому необходим подход к моделированию процессов структурных переходов в нём, который

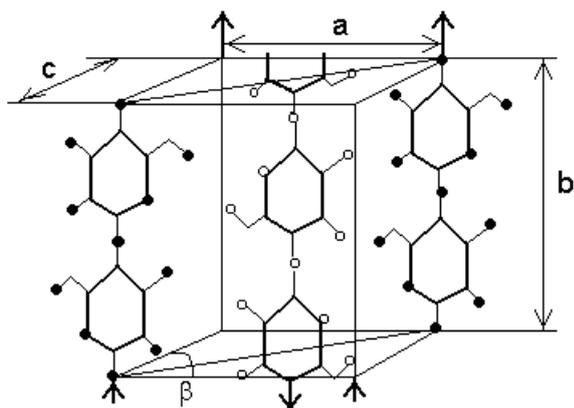


Рисунок 1 – Пространственная модель Меера-Миша [3] элементарной ячейки целлюлозы. Черными и белыми кружками отмечены атомы кислорода

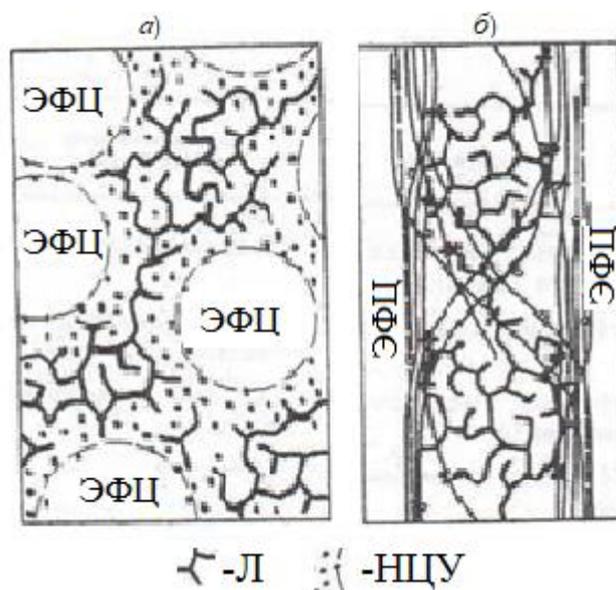


Рисунок 2 – Схема строения древесинного вещества вторичной оболочки клеточных стенок древесины березы: *a* – поперечный срез, *б* – продольный срез (ЭФЦ – элементарные фибриллы целлюлозы; Л – лигнин; НЦУ – нецеллюлозные углеводы (гемицеллюлозы) [5]

позволит прогнозировать степень влияния внешних и внутренних факторов, например, на явление термополяризации в срезе зрелой древесины в условиях постоянного градиента температуры вдоль его толщины. Необходимо отметить, что в зависимости от цели исследований вещество древесины может быть представлено как частично кристаллическая структура или лингоуглеводная матрица, формируемая взаимопроникновением сеток углеводов и лигнина, которые образованы, в основном, силами физического взаимодействия и водородными связями [5]. В любом случае основная проблема в понимании механизма, например, формирования разности потенциалов в срезах зрелой древесины в неоднородном температурном поле, состоит в невозможности выделения в композите природного происхождения основного структурного элемента. Поэтому моделирование методом конструкций (цепочек) повторяющихся комбинаций атомов при описании объекта исследования просто неприемлемо.

Целью представленной работы является теоретическое обоснование механизма формирования разности потенциалов вдоль толщины тонкого среза древесины в неоднородном температурном поле в рамках неравновесной термодинамики.

Для теоретического обоснования решения поставленной задачи рассмотрим возникающую в древесине разность потенциалов как результат комплексной термостимулированной поляризации в неоднородном температурном поле. Во-первых, в кристаллической части целлюлозы в силу её пьезоэлектрических и пироэлектрических свойств сформируется разность потенциалов U_d , обусловленная постоянным градиентом температуры. Во-вторых, аморфную компоненту целлюлозы и нецеллюлозные углеводы совместно с лигнином целесообразно представить как матрицу, состоящую из трех сеток,

образованных преимущественно водородными связями и физическими взаимодействиями (Н-сетка), валентными (ЛУ-сетка) и структурой собственно лигнина (Л-сетка), дополнительную связь между компонентами которой создают механические «зацепления» сегментов макромолекул с образованием так называемых «лабиринтных структур» (см. рис. 2а). В такой сложной структуре в электрическом поле с разностью потенциалов U_{dp} начинается процесс ориентационной поляризации сегментов макромолекул (например, в Н- и Л-сетках), приводящей к дополнительной поляризованности P_{in} . Описание именно этого механизма и требует теоретического обоснования в рамках термодинамического подхода, поскольку информации о микроструктурных изменениях такой сложной и самобытной (индивидуальной для каждого среза) матрицы, вообще говоря, недостаточно для формирования ее модельного отображения в виде комбинации базовых структурных элементов. В основу дальнейших рассуждений будет положен тот факт, что её устойчивое состояние (стационарное), в котором появится возможность для измерения разности потенциалов, должно соответствовать минимуму функции Гиббса (dG) и Гельмгольца (dF):

$$\begin{aligned} dF &= dU - TdS = 0 \\ dG &= dU - TdS - dTS + dPV + PdV = 0' \end{aligned} \quad (1)$$

где dU – изменение внутренней энергии матрицы за время dt ; S – энтропия; V , T и P – термодинамические параметры состояния: объем, температура и давление соответственно. Из первого уравнения системы (1) с учетом наличия постоянного градиента температуры $\Delta T/h$ можно записать, что

$$dU = TdS = \delta Q = \lambda \sigma \frac{\Delta T}{h} dt, \quad (2)$$

где λ и σ – теплопроводность и площадь древесного среза. Второе уравнение системы (1) в силу незначительности флуктуаций объема в установившемся состоянии матрицы ($dV \approx 0$) преобразуется к виду

$$dPV - dTS = 0. \quad (3)$$

Из соотношения (3) можно получить выражение для энтропии

$$S = \chi V, \quad (4)$$

в котором коэффициент $\chi = dP/dT$ определяется отношением флуктуаций давления и температуры непосредственно в матрице. Тогда изменение энтропии представится как

$$dS = \chi V \left(\frac{d\chi}{\chi} + \frac{dV}{V} \right) = \chi \sigma h (1 + \beta_T \Delta T) \left(\frac{d\chi}{\chi} + \frac{dV}{V} \right), \quad (5)$$

где β_T – коэффициент температурного расширения матрицы. Поскольку при установлении стационарного состояния $d\chi/\chi \rightarrow 0$, соотношение (5) переписывается в виде:

$$dS = (1 + \beta_T \Delta T) d \left(\ln \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^\delta \right), \quad (6)$$

где показатель степени $\delta = \chi \sigma h (1 + \beta_T \Delta T)$.

Несмотря на тот факт, что невозможно выделить базовый элемент рассматриваемой матрицы, целесообразно ввести усредненные объемы сегментов аморфной матрицы в конечном (V_m) и начальном (V_n) состояниях. Тогда для относительного изменения объема будет справедливо соотношение

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{N}{N^* - N\eta}, \quad (7)$$

где N – число сегментов, изменивших свой объем в результате конформации в процессе поляризации в неоднородном температурном поле; N^* – общее число сегментов матрицы; $\eta = (V_m - V_n)/V_m$. Из уравнений (6) и (7) следует, что

$$dS = (1 + \beta_T \Delta T) d \left(\ln \left(\frac{N\eta}{N^* - N\eta} \right)^\delta \right). \quad (8)$$

На основе термодинамического определения энтропии $dS = \delta Q/T$ с учетом (2) получим дифференциальное уравнение для нахождения N :

$$\frac{dN}{N(1 - \mu N)} = \frac{\lambda \sigma \Delta T}{\delta(1 + \beta_T \Delta T) T h} dt, \quad (9)$$

где $\mu = \eta/N^*$. Поскольку срезы древесины очень тонкие, то можно в качестве T вполне обоснованно использовать среднюю температуру в срезе, которая составляет $T = T_{max} - 0,5\Delta T$.

Введем обозначение

$$\alpha = \frac{\lambda \sigma \Delta T}{\delta(1 + \beta_T \Delta T)(T_{max} - 0,5\Delta T)h}. \quad (10)$$

Тогда соотношение (9) преобразуется в дифференциальное уравнение первого порядка, аналитическое решение которого при условии, что в момент попадания в неоднородное температурное поле в аморфной углеводной матрице $N = N_0$, можно записать в виде:

$$N = \frac{N_0 \exp(-\alpha t)}{1 + \mu N_0 (\exp(-\alpha t) - 1)}. \quad (11)$$

Поскольку ориентационная поляризованность P_{in} определяется как $P_{in} = p_i N$ (p_i – дипольный момент ориентированного сегмента), то для разности потенциалов в срезе получится соотношение [6]:

$$U_s = U_{dp} + \frac{U_0 \exp(-\alpha t)}{1 + \gamma (\exp(-\alpha t) - 1)}, \quad (12)$$

где $\gamma = \mu N_0$.

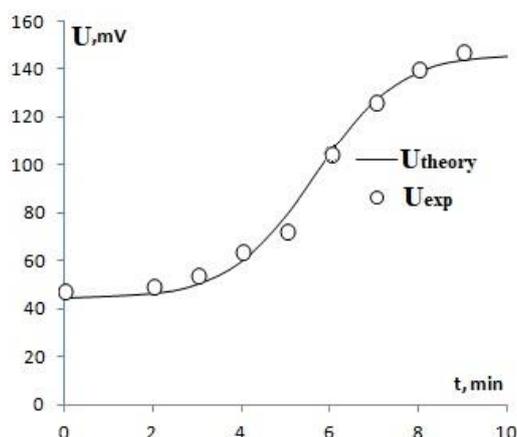


Рисунок 3 – Динамика разности потенциалов, формируемой в образце, вырезанном из древесины березы влажностью 40%, в измерительной ячейке при нагревании нижнего электрода со скоростью $1,43 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$ [6]

Для интерпретации модели в работе были использованы данные измерений разности потенциалов (обозначены кружками на рис. 3) в микротомных продольных срезах древесины березы толщиной $h \approx 100$ мкм [6]. Определение параметров модели осуществлялось на основе критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (ME), который традиционно используется в задачах проверки адекватности моделей процессов в частично самоорганизующихся системах [7]. В вычислительном эксперименте критерий Нэша-Сатклиффа достиг максимальной величины ($ME = 0,993$) при следующих параметрах модели: $U_0 = 0,28$ мВ, $\alpha = 1,04$ мин⁻¹, $U_{др} = 44,5$ мВ и $\gamma = 0,98\%$. Результаты моделирования представлены сплошной линией на рисунке 3.

В заключение хотелось бы сделать следующие выводы:

1) в рамках термодинамического подхода можно теоретически обосновать механизм термостимулированной ориентационной поляризации в лингоуглеводной матрице тонких срезов древесины;

2) минимизация функции Гельмгольца и Гиббса может быть использована для понимания различных процессов в полимерных композитах, в том числе и природного происхождения, как частично самоорганизующихся системах;

3) определение параметров динамики процесса формирования разности потенциалов в неоднородном температурном поле на основе критерия Нэша-Сатклифа может значительно расширить существующие представления о структурных изменениях в природных гетероструктурах под влиянием различных физических факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е. Демин; под ред. В.И. Новосельцева. – Москва: Майор, 2006. – 592 с.

2. Матвеев, Н.Н. Поляризационные эффекты в кристаллизующихся полимерах и биокомпозиционных материалах в неоднородном температурном поле : монография / Н.Н. Матвеев, Н.С. Камалова, Н.Ю. Евсикова ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2021. – 322 с.

3. Камалова, Н.С. Физические основы модифицирования древесины : монография / Н.С. Камалова, В.В. Постников ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2019. – 164 с.

4. Возможности оценивания бассейновой транспирации на основе измерения стволового сокодвижения: постановка задачи / Т.С. Губарева, С.Ю. Лупаков, Б.И. Гарцман, В.В. Шамов, А.В. Рубцов, Н.К. Кожевникова // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2019. – Т. 1, Вып. 4. – С. 504-532. – DOI:10.34753/HS.2019.1.4.504.

5. Barkas, W.W. Mechanical Properties of Wood and Paper / W.W. Barkas, R.F. Hearmon, Y.F. Rauce. – Amsterdam, 1953. – 321 p.

6. Formalized model of cellulose thermopolarization processes in natural wood in a non-uniform temperature field / N.S. Kamalova, N.N. Matveev, N.Yu. Evsikova, V.I. Lisitsyn, S.V. Vnukova, H.T. Nguyen // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – Vol. 16, Iss. 1.1. – P. 262-268. – DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.161.144>.

7. Nash, J.E. Riverflow 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.

REFERENCES

1. Theoretical foundations of system analysis / V.I. Novoseltsev, B.V. Tarasov, V.K. Golikov, B.E. Demin; edited by IN AND. Novoseltseva. – Moscow: Major, 2006. – 592 p.

2. Matveev, N.N. Polarization effects in crystallizing polymers and biocomposite materials in a non-uniform temperature field: monograph / N.N. Matveev, N.S. Kamalova, N.Yu. Evsikova; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "VSUFT". – Voronezh, 2021. – 322 p.

3. Kamalova, N.S. Physical principles of wood modification: monograph / N.S. Kamalova, V.V. Postnikov; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "VSUFT". – Voronezh, 2019. – 164 p.

4. Possibilities for assessing basin transpiration based on measuring stem sap flow: problem statement / T.S. Gubareva, S.Yu. Lupakov, B.I. Gartsman, V.V. Shamov, A.V. Rubtsov, N.K. Kozhevnikova // *Hydrosphere. Dangerous processes and phenomena*. – 2019. – Vol. 1, Iss. 4. – P. 504-532. – DOI:10.34753/HS.2019.1.4.504.

5. Barkas, W.W. Mechanical Properties of Wood and Paper / W.W. Barkas, R.F. Hearmon, Y.F. Rauce. – Amsterdam, 1953. – 321 p.

6. Formalized model of cellulose thermopolarization processes in natural wood in a non-uniform temperature field / N.S. Kamalova, N.N. Matveev, N.Yu. Evsikova, V.I. Lisitsyn, S.V. Vnukova, H.T. Nguyen // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. – 2023. – Vol. 16, Iss. 1.1. – P. 262-268. – DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.161.144>.

7. Nash, J.E. Riverflow 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.

**ВИРТУАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ПОЯВЛЕНИЯ ТРЕТЬИХ ЛЕГКИХ
ПРЕДРАЗРЫВНЫХ ЯДЕР В ТРОЙНОМ СПОНТАННОМ И ВЫНУЖДЕННОМ
ДЕЛЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР**

VIRTUAL CHARACTER OF THE EMISSION OF THE THIRD LIGHT
PRESCISSION NUCLEI IN THE TERNARY SPONTANEOUS AND INDUCED
FISSION OF HEAVY NUCLEI

Отводенко Я.О., аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия
Кадменский С.Г., доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры ядерной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Otvodenko Ya.O., postgraduate student, Voronezh State University", Voronezh, Russia
Kadmensky S.G., Doctor in Physics and Mathematics, Professor, Professor of the Department of Nuclear Physics, "Voronezh State University", Voronezh, Russia

Аннотация. В рамках квантовой теории деления на основе механизма тройного деления, учитывающего формирование промежуточного ядра в виртуальном состоянии, продолжаются исследования экспериментальных характеристик предразрывных легких ядер для случаев тройного спонтанного и вынужденного деления (при участии тепловых нейтронов) тяжелых ядер ^{252}Cf и ^{235}U , ^{239}Pu , соответственно. На базе теории альфа-распада Гамова были рассчитаны вероятности формирования ядер ω_{n_3} в родительских ядрах. Обнаружено, что для случаев появления третьих легких ядер в двух видах деления (спонтанном и вынужденном) оказываются близкими такие характеристики, как значения выходов δ_{n_3} , максимумов экспериментальных энергетических распределений T_{n_3max} , а также полученных в данной работе для предразрывных легких ядер вероятностей формирования ω_{n_3} .

Ключевые слова: тройное деление ядер, виртуальный механизм, спонтанное и вынужденное деление, предразрывные легкие ядра, вероятность формирования в родительском ядре.

Abstract. Within the framework of the quantum fission theory on the base of the mechanism of the intermediate nucleus formation in the virtual state, research continues on the experimental characteristics of prescission light nuclei for cases of ternary spontaneous and induced fission (with the participation of thermal neutrons) of heavy nuclei ^{252}Cf and ^{235}U , ^{239}Pu , respectively. On the basis of Gamow's alpha-decay theory, the probabilities of the formation of ω_{n_3} nuclei in the parent nuclei were calculated. It was found that for the cases of the appearance of third particles in two types of fission (spontaneous and induced), such characteristics as the values of the yields δ_{n_3} , the maxima of the experimental energy distributions T_{n_3max} , as well as the probabilities of formation of ω_{n_3} obtained in this work for prescission light nuclei, are close.

Keywords: ternary nuclear fission, virtual mechanism, spontaneous and induced fission, pre-scission light nuclei, probability of formation in the parent nucleus.

Введение

В теории элементарных частиц хорошо известны распады и реакции с участием промежуточных виртуальных состояний различных элементарных частиц [1]. Одной из таких реакций является комптоновское рассеяние фотонов на свободных электронах. Амплитуду этого рассеяния можно представить диаграммой Фейнмана, которая содержит функцию Грина, описывающую виртуальное состояние промежуточного электрона e^* , энергия и момент которого не связаны релятивистской формулой Эйнштейна.

Ответ на вопрос о существовании ядерных распадов и реакций с появлением виртуальных состояний промежуточных составных ядер, энергии которых лежат вне массовых поверхностей этих распадов и реакций, был дан в статье [2].

Цель настоящей работы – проанализировать экспериментальные характеристики вынужденного и спонтанного тройного деления ядер ^{235}U , ^{239}Pu и ^{252}Cf , соответственно, с вылетом ^6He , ^8He , Li , Be и найти вероятности формирования указанных легких ядер в родительских ядрах.

1. Виртуальный механизм тройного деления атомных ядер с испусканием предразрывных лёгких ядер

В рамках виртуального механизма ядерных распадов и реакций были выполнены расчеты [3], которые показали хорошее согласие с экспериментальными данными по тройному делению с вылетом предразрывных α -частиц [4]. Описание процессов появления третьих предразрывных легких ядер далее будет производиться в рамках указанного подхода.

Для дальнейшего анализа необходимо ввести ширину Γ_{n_3f} виртуального тройного деления ядра, теплоту распада Q_f , выход δ_{n_3} третьих легких ядер, энергетическое распределение $W_{n_3f}(T_{n_3})$ и вероятность формирования ω_{n_3} в родительском ядре, где индексом n_3 обозначены появляющиеся в тройном делении третьи легкие ядра.

Ширина Γ_{n_3f} виртуального спонтанного тройного деления ядра с вылетом третьих легких ядер построена в [5] и определяется выражением:

$$\Gamma_{n_3f} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{Q_f} \frac{\Gamma_{n_3}(T_{n_3})\Gamma_f(Q_f - T_{n_3} + Q_{n_3})}{(Q_{n_3} - T_{n_3})^2} dT_{n_3}, \quad (1)$$

где $\Gamma_{n_3}(T_{n_3})$ – ширина n_3 -распада основного состояния ядра (A, Z) с испусканием ядер n_3 и образованием основных состояний дочернего ядра $(A - A_{n_3}, Z - Z_{n_3})$; $\Gamma_f(Q_f - T_{n_3} + Q_{n_3})$ – полная ширина двойного деления ядер $(A - A_{n_3}, Z - Z_{n_3})$ с теплотой этого распада Q_f :

$$Q_f = E(A - A_{n_3}, Z - Z_{n_3}) - E(A - A_{LF}, Z - Z_{LF}) - E(A - A_{HF}, Z - Z_{HF}). \quad (2)$$

Выход δ_{n_3} в тройном делении ядер к числу фрагментов двойного деления и энергетическое распределение $W_{n_3f}(T_{n_3})$ вылетающих третьих легких ядер определяются по формулам из [6].

Используя экспериментальные значения $W_{n_3f}(T_{n_3})$ для случаев появления различных легких ядер, можно построить ширину $\Gamma_{n_3}(T_{n_3})$:

$$\Gamma_{n_3}(T_{n_3}) = \omega_{n_3} \frac{\hbar \sqrt{2T_{n_3}}}{2r_{neck} \sqrt{M_{n_3}}} P(T_{n_3}), \quad (3)$$

где $P(T_{n_3})$ – фактор проницаемости кулоновского барьера, равный единице при максимальной кинетической энергии вылетающего легкого ядра; ω_{n_3} – вероятность формирования легкого ядра n_3 в родительском ядре; r_{neck} – радиус шейки родительского ядра; \hbar – приведенная постоянная Планка и c – скорость света.

Проведя простые преобразования, из (3) можно получить формулу для оценки вероятности формирования третьего легкого ядра в родительском ядре:

$$\omega_{n_3} = \frac{\Gamma_{n_3}(T_{n_3}) 2r_{neck} \sqrt{M_{n_3} c^2}}{\hbar c \sqrt{2T_{n_3}}} \quad (4)$$

При помощи указанных и ранее [3, 6, 7] успешно примененных формул можно найти вероятности формирования третьих ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, Li , Be в процессе тройного деления ядер ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$ и ${}^{252}\text{Cf}$. Радиус шейки r_{neck} приведен в [8] и составляет 2,5 Фм.

2. Спонтанное и вынужденное (с участием тепловых нейтронов) тройное деление ядер

2.1. Вынужденное тройное деление ядра ${}^{235}\text{U}$ с испусканием предразрывных ${}^6\text{He}$, Li , Be

При использовании экспериментальных данных оценены вероятности формирования ω_{n_3} третьих легких ядер ${}^6\text{He}$ [9, 10], Li , Be [11] в родительском ядре. В таблице 1 представлены третьи легкие ядра, появляющиеся при тройном делении ядра ${}^{235}\text{U}$, и соответствующие данному процессу выходы δ_{n_3} этих легких ядер, отнесенные к числу фрагментов двойного деления, T_{n_3max} – максимальные кинетические энергии легких ядер, $FWHM$ – ширины энергетических распределений на половине высоты, ω_{n_3} – вероятности формирования легких ядер в родительском ядре.

Таблица 1 – Характеристики различных третьих легких ядер при вынужденном (n,f) тройном делении ядра ${}^{235}\text{U}$

Делящееся ядро	Третье легкое ядро n_3	δ_{n_3}	T_{n_3max} (МэВ)	$FWHM$, МэВ	ω_{n_3}
${}^{235}\text{U}$	${}^6\text{He}$	$1,6 \times 10^{-5}$	$12,9 \pm 0,5$	$8,7 \pm 0,7$	$0,8 \times 10^{-3}$
	Li (сумма изотопов ${}^7\text{Li}$, ${}^8\text{Li}$, ${}^9\text{Li}$)	$(1,33 \pm 0,08) \times 10^{-6}$	16,3	13,17	1×10^{-4}
	Be (сумма изотопов ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$)	$(4,13 \pm 0,22) \times 10^{-6}$	20,0	16,0	1×10^{-4}

На рис. 1 и 2 продемонстрированы энергетические распределения $W_{n_3f}(T_{n_3})$ предразрывных ${}^6\text{He}$, Li и Be на примере тройного деления ядра ${}^{235}\text{U}$.

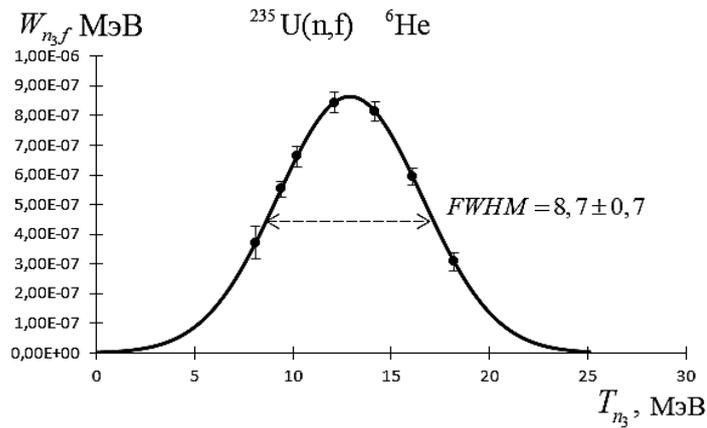
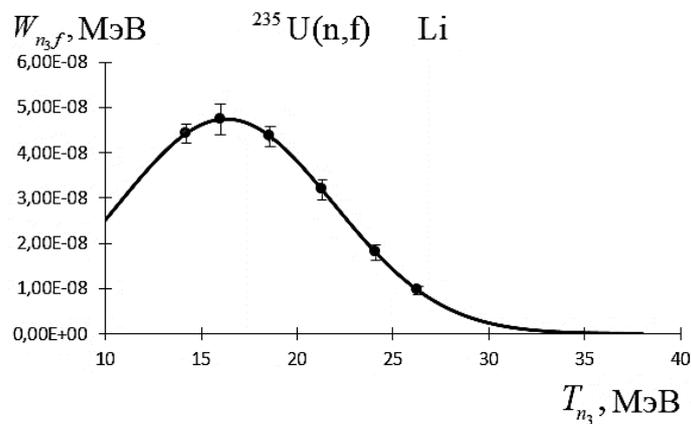
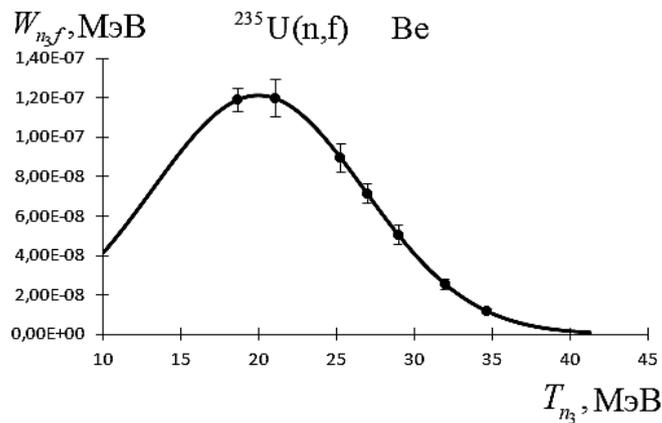


Рисунок 1 – Энергетическое распределение $W_{n_3 f}(T_{n_3})$ предразрывных ${}^6\text{He}$ [10], появляющихся при вынужденном делении ${}^{235}\text{U}$



а)



б)

Рисунок 2 – Энергетические распределения предразрывных а) Li, б) Be [11], появляющихся при вынужденном делении ${}^{235}\text{U}$

2.2. Вынужденное тройное деление ядра ${}^{239}\text{Pu}$ с испусканием предразрывных ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$

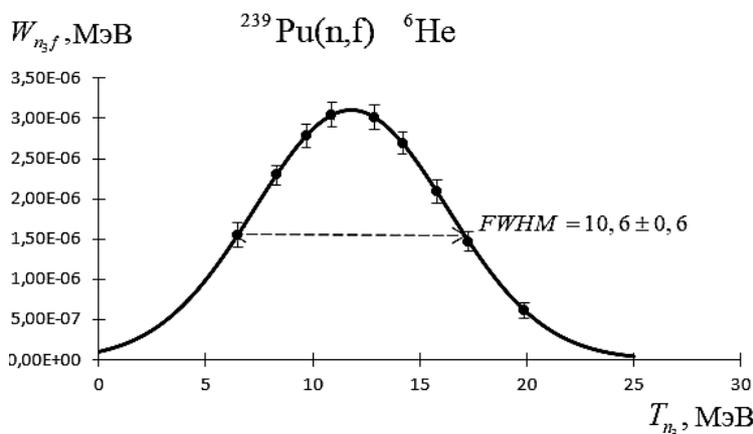
При использовании экспериментальных данных были оценены вероятности формирования ω_{n_3} третьих легких ядер ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$ [9] в родительском ядре. В таблице 2 представлены третьи легкие ядра, появляющиеся при тройном делении ядра ${}^{239}\text{Pu}$, и соответствующие данному процессу выходы δ_{n_3} этих легких ядер к числу фрагментов

двойного деления, T_{n_3max} – максимальные кинетические энергии, $FWHM$ – ширины распределений на половине высоты, ω_{n_3} – рассчитанные вероятности формирования легких ядер в родительском ядре.

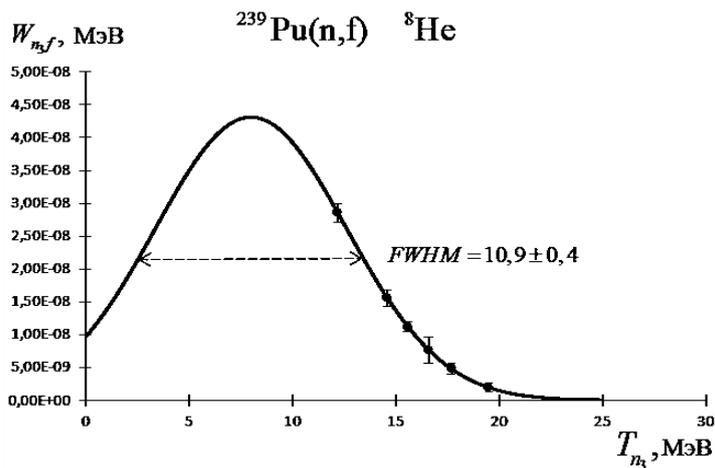
Таблица 2 – Характеристики различных третьих легких ядер при вынужденном (n,f) тройном делении ядра ^{239}Pu

Делящееся ядро	Третье легкое ядро n_3	δ_{n_3}	T_{n_3max} (МэВ)	$FWHM$, МэВ	ω_{n_3}
^{239}Pu	^6He	7×10^{-5}	$11,8 \pm 0,4$	$10,6 \pm 0,6$	$2,5 \times 10^{-3}$
	^8He	$< 1 \times 10^{-6}$	$8,0 \pm 0,2$	$10,9 \pm 0,4$	$0,9 \times 10^{-4}$

На рис. 3 представлены энергетические распределения $W_{n_3f}(T_{n_3})$ для вынужденного тройного деления ядра ^{239}Pu с появлением ^6He и ^8He , соответственно.



а)



б)

Рисунок 3 – Энергетические распределения $W_{n_3f}(T_{n_3})$ предразрывных а) ^6He , б) ^8He [9], появляющихся при вынужденном делении ^{239}Pu

2.3. Спонтанное тройное деление ядра ^{252}Cf с испусканием предразрывных ^6He , ^8He , Li , Be

При использовании экспериментальных данных оценены вероятности формирования ω_{n_3} третьих легких ядер ^6He [9], ^8He , Li , Be [12, 13] в родительском ядре. В таблице 3

представлены третьи легкие ядра, появляющиеся при тройном делении ядра ^{252}Cf , и соответствующие данному процессу характеристики.

Таблица 3 – Характеристики различных третьих легких ядер при спонтанном (s,f) тройном делении ядра ^{252}Cf

Делящееся ядро	Третье легкое ядро n_3	δ_{n_3}	T_{n_3max} (МэВ)	$FWHM$, МэВ	ω_{n_3}
^{252}Cf	^6He	$7,7 \times 10^{-5}$	$11,22 \pm 0,52$	$8,95 \pm 0,81$	$2,5 \times 10^{-3}$
	^8He	$(5,9 \pm 1,6) \times 10^{-6}$	$10,2 \pm 1,0$	$8,0 \pm 2,0$	$6,07 \times 10^{-4}$
	Li (сумма изотопов)	$(3,9 \pm 2,0) \times 10^{-6}$	$20,0 \pm 1,0$	$6,6 \pm 2,0$	$3,39 \times 10^{-4}$
	Be (сумма изотопов)	$(4,8 \pm 0,2) \times 10^{-6}$	~ 26	~ 11	$1,3 \times 10^{-4}$

Энергетические распределения $W_{n_3f}(T_{n_3})$ предразрывных ^6He и ^8He , появляющихся при спонтанном делении ядра ^{252}Cf , представлены на рис. 4, а для случаев появления Li и Be – на рис. 5.

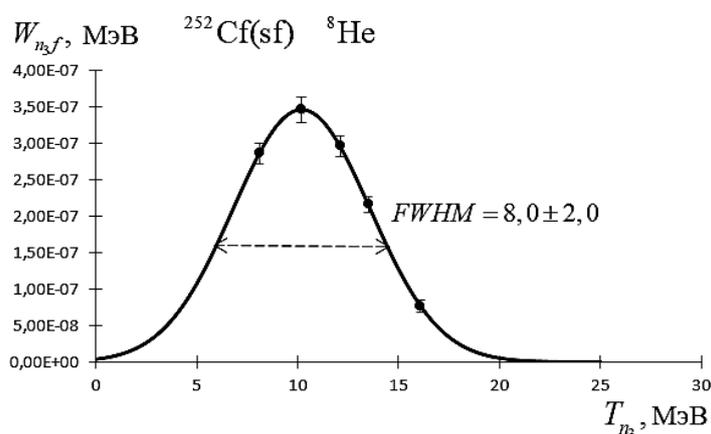
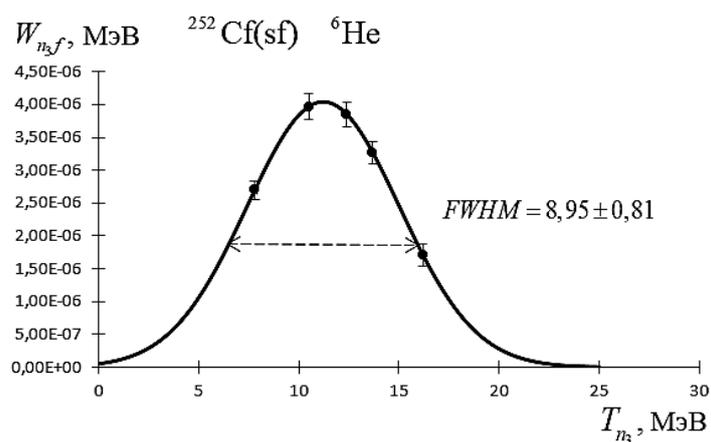
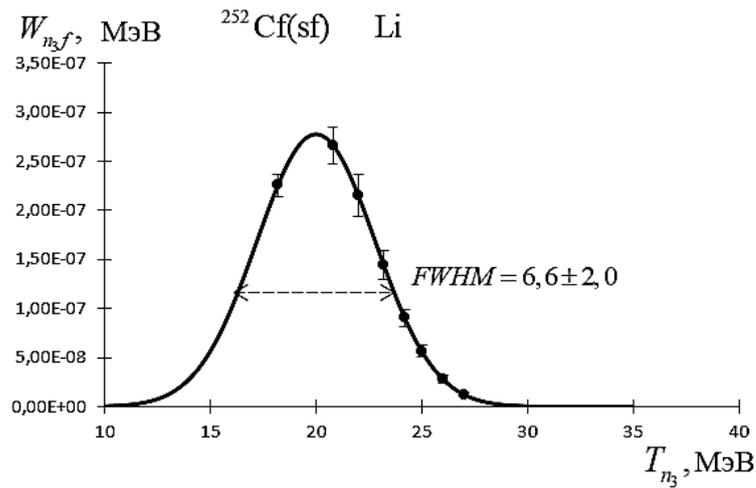
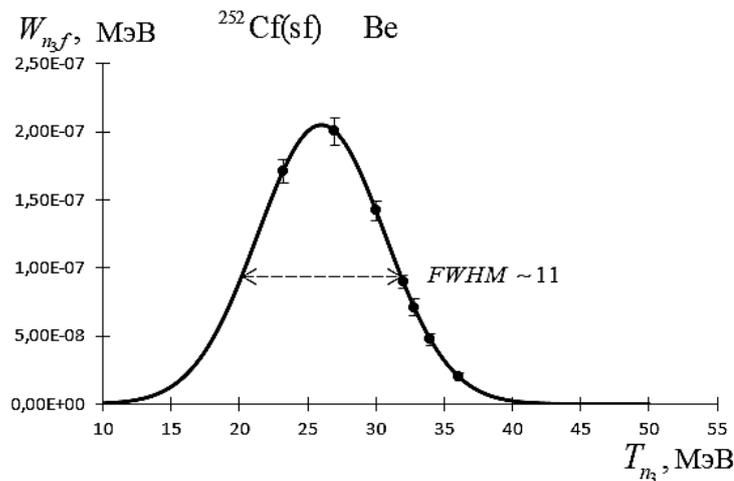


Рисунок 4 – Энергетические распределения $W_{n_3f}(T_{n_3})$ предразрывных а) ^6He [9, 13], б) ^8He [12], появляющихся при вынужденном делении ^{252}Cf



а)



б)

Рисунок 5 – Энергетические распределения $W_{n3f}(T_{n3})$ предразрывных а) Li, б) Be [12], появляющихся при вынужденном делении ^{252}Cf

4. Обсуждение

Как видно из табл. 1-3, для рассмотренных делящихся ядер выходы δ_{n_3} в случае появления ^6He близки как для спонтанного, так и для вынужденного деления и составляют $1,6 \times 10^{-5} \leq \delta_{n_3} \leq 7,7 \times 10^{-5}$, для случая Li находятся в диапазоне $1,33 \times 10^{-6} \leq \delta_{n_3} \leq 4,8 \times 10^{-6}$, для Be в диапазоне $4,13 \times 10^{-6} \leq \delta_{n_3} \leq 4,8 \times 10^{-6}$. Аналогичная ситуация реализуется для вероятностей формирования ^6He : $0,8 \times 10^{-3} \leq \omega_{n_3} \leq 2,5 \times 10^{-3}$, в случае Li – $1 \times 10^{-4} \leq \omega_{n_3} \leq 3,39 \times 10^{-4}$, а в случае Be составляют $1 \times 10^{-4} \leq \omega_{n_3} \leq 1,3 \times 10^{-4}$. В случае появления ^8He в спонтанном тройном делении, как выход δ_{n_3} , так и вероятность формирования ω_{n_3} оказываются несколько больше, чем в вынужденном делении, но находятся в пределах одного порядка. Близкими оказываются такие характеристики, как ширина максимума на полувысоте $FWHM$ и формы распределения энергии $W_{n3f}(T_{n3})$ как для спонтанного, так и для вынужденного деления тяжелых ядер. Заметные положительные значения разности $(T_{n3max} - Q_{n3})$ показывают, что анализируемые процессы тройного деления носят виртуальный характер.

Заключение

В работе в рамках виртуального механизма был проведен анализ экспериментальных характеристик третьих предразрывных ядер ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, Li , Be , появляющихся в тройном вынужденном (при участии тепловых нейтронов) и спонтанном делении ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$ и ${}^{252}\text{Cf}$, соответственно. Основываясь на представлениях квантовой теории деления и предложенном механизме, а также предполагая, что появляющиеся при делении легкие ядра, подобно альфа-частице, вылетают из шейки составного делящегося ядра, при использовании экспериментальных характеристик на базе теории альфа-распада Гамова, были рассчитаны вероятности формирования легких ядер ω_{n_3} в родительских ядрах. Для двух указанных видов деления для различных делящихся ядер выявлена близость энергетических распределений, выходов и вероятностей формирования третьих легких ядер в родительских ядрах.

Представляется интересным исследование свойств (включая угловые распределения) других третьих предразрывных легких ядер, появляющихся в спонтанном и вынужденном тройном делении и, соответственно, расширение класса распадов, относящихся к виртуальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольданский, В.И. Пределы стабильности и протонная и двухпротонная радиоактивность нейтронодефицитных изотопов легких ядер / В.И. Гольданский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1961. – Т. 39, № 2. – С. 497.
2. Кадменский, С.Г. Теория многоступенчатых статистических распадов в цепочках генетически связанных ядер / С.Г. Кадменский, А.О. Булычев // Известия РАН. Серия физическая. – 2016. – Т. 80, № 8. – С. 1009-1014.
3. Кадменский, С.Г. Новый класс ядерных распадов с участием виртуальных состояний промежуточных ядер / С.Г. Кадменский, Л.В. Титова, Д.Е. Любашевский // Ядерная физика. – 2020. – Т. 83, № 4. – С. 326-335.
4. Кадменский, С.Г. Альфа-распад и родственные ядерные реакции / С.Г. Кадменский, В.И. Фурман. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 221 с.
5. Кадменский, С.Г. Обобщенный подход к описанию многоступенчатых распадов в цепочках генетически связанных ядер / С.Г. Кадменский, А.О. Булычев // Известия РАН. Серия физическая. – 2015. – Т. 79, № 7. – С. 967-974.
6. Кадменский, С.Г. Виртуальный характер спонтанного и вынужденного (с участием тепловых нейтронов) тройного деления ядер с испусканием предразрывных нуклонов и легких ядер / С.Г. Кадменский, Я.О. Отводенко // Ядерные и родственные аналитические методы в экологии и материаловедении: материалы международного семинара по взаимодействию нейтронов с ядрами - 29. – Дубна, 2023. – С. 247-262.
7. Титова, Л.В. Виртуальный механизм тройного деления ядер / Л.В. Титова // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия: журнал. – Москва: МГУ, 2021. – № 5. – С. 64-69.
8. Serot, O. Description of long-range alpha emission using the sudden approximation / O. Serot, N. Carjan, C. Wagemans // The European Physical Journal A. – 2000. – Vol. 8. – P. 187-196.

9. Emission of light nuclei in thermal neutron fission of ^{239}Pu / T. Krogulski, J. Chwaszczewska, M. Dakowski, E. Piasecki, M. Sowiński // Nuclear Physics A. – 1969. – Vol. 128. – P. 219-223.
10. Energy spectra of long range particles from the thermal neutron fission of ^{235}U / M. Dakowski, J. Chwaszczewska, T. Krogulski, E. Piasecki, M. Sowinski // Physics Letter B. – 1967. – Vol. 25, No. 3. – P. 213-214.
11. Li and Be nuclei emitted during the thermal neutron fission of ^{235}U / J. Blocki, J. Chwaszczewska, M. Dakowski, T. Krogulski, E. Piasecki, M. Sowinski, A. Stegner, T. Tys // Nuclear Physics A. – 1969. – Vol. 127. – P. 495.
12. Cospers, S.W. Long-Range Particles of $Z=1$ to 4 Emitted During the Spontaneous Fission of ^{252}Cf / S.W. Cospers, J. Cerny, R.C. Gatti // Physical Review. – 1967. – Vol. 154, No. 4. – P. 1193-1206.
13. ^5He , ^7He , and ^8Li ($E^*=2.26$ MeV) intermediate ternary particles in the spontaneous fission of ^{252}Cf / Yu.N. Kopatch, M. Mutterer, D. Schwalm, P. Thirolf, F. Gonnemann // Physical Review C. – 2002. – Vol. 65. – P. 044614-1 - 044614-16.

REFERENCES

1. Gol'danskii, V.I. Limits of stability and proton and two-proton radioactivity of neutron-deficient isotopes of light nuclei / V.I. Gol'danskii // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1961. – Vol. 12, No. 2. – P. 348-351.
2. Kadmensky, S.G. Theory of multistep statistical decays in chains of genetically related nuclei / S.G. Kadmensky, A.O. Bulychev // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2016. – Vol. 80, No. 8. – P. 921-926.
3. Kadmensky, S.G. New class of nuclear decays involving virtual states of intermediate nuclei / S.G. Kadmensky, L.V. Titova, D.E. Lyubashevsky // Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – Vol. 83, No. 4. – P. 581-590.
4. Kadmensky, S.G. Alpha-decay and related nuclear reactions / S.G. Kadmensky, V.I. Furman. – Moscow: Energoatomizdat, 1985. – 221 p.
5. Kadmensky, S.G. A generalized approach to describing multistep decays in chains of genetically related nuclei / S.G. Kadmensky, A.O. Bulychev // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2015. – Vol. 79, No. 7. – P. 872-878.
6. Kadmensky, S.G. The virtual character of spontaneous and induced (with the participation of thermal neutrons) ternary fission of nuclei with the emission of prescission nucleons and light nuclei / S.G. Kadmensky, Ya.O. Otvodenko // Nuclear and related analytical techniques in environmental and material science: materials of the International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei - 29. – Dubna, 2023. – P. 247-262.
7. Titova, L.V. Virtual mechanism of ternary nuclear fission / L.V. Titova // VMU. Series 3. Physics. Astronomy: journal. – Moscow: MSU, 2021. – No. 5. – P. 64-69.
8. Serot, O. Description of long-range alpha emission using the sudden approximation / O. Serot, N. Carjan, C. Wagemans // The European Physical Journal A. – 2000. – Vol. 8. – P. 187-196.

9. Emission of light nuclei in thermal neutron fission of ^{239}Pu / T. Krogulski, J. Chwaszczewska, M. Dakowski, E. Piasecki, M. Sowiński // Nuclear Physics A. – 1969. – Vol. 128. – P. 219-223.
10. Energy spectra of long range particles from the thermal neutron fission of ^{235}U / M. Dakowski, J. Chwaszczewska, T. Krogulski, E. Piasecki, M. Sowinski // Physics Letter B. – 1967. – Vol. 25, No. 3. – P. 213-214.
11. Li and Be nuclei emitted during the thermal neutron fission of ^{235}U / J. Blocki, J. Chwaszczewska, M. Dakowski, T. Krogulski, E. Piasecki, M. Sowinski, A. Stegner, T. Tys // Nuclear Physics A. – 1969. – Vol. 127. – P. 495.
12. Cospers, S.W. Long-Range Particles of $Z=1$ to 4 Emitted During the Spontaneous Fission of ^{252}Cf / S.W. Cospers, J. Cerny, R. C. Gatti // Physical Review. – 1967. – Vol. 154, No. 4. – P. 1193-1206.
13. ^5He , ^7He , and ^8Li ($E^*=2.26$ MeV) intermediate ternary particles in the spontaneous fission of ^{252}Cf / Yu.N. Kopatch, M. Mutterer, D. Schwalm, P. Thirolf, F. Gonnemann // Physical Review C. – 2002. – Vol. 65. – P. 044614-1 - 044614-16.

**ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННИКА-ГАЗИФИКАТОРА ВОДОРОДНОГО
ТОПЛИВА ДЛЯ АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**
THERMAL CALCULATION OF HYDROGEN FUEL GASIFIER HEAT EXCHANGER
FOR AIRCRAFT GAS-TURBINE ENGINE

Панченко С.Л., кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия
Panchenko S.L., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье обоснована возможность применения альтернативного авиационному керосину водородного топлива для авиационных двигателей. Доказана необходимость охлаждения воздуха перед компрессором двигателя. Обоснована необходимость газификации жидкого водорода перед подачей в камеру сгорания двигателя. Предложена конструкция теплообменника-газификатора жидкого водорода, в котором за счет теплоты парообразования водорода охлаждается воздух, поступающий на вход в компрессор. Разработана методика теплового расчета теплообменника-газификатора.

Ключевые слова: водородное топливо, теплообменник-газификатор, тепловой расчет, авиационный газотурбинный двигатель.

Abstract. The article substantiates the possibility of using hydrogen fuel as an alternative to aviation kerosene for aircraft engines. The necessity of cooling the air in front of the engine compressor has been proven. The necessity of gasification of liquid hydrogen before supplying it to the combustion chamber of the engine is substantiated. A design has been proposed for a liquid hydrogen gasifier heat exchanger, in which the air entering the compressor is cooled due to the heat of hydrogen vaporization. A method for thermal calculation of a heat exchanger-gasifier has been developed.

Keywords: hydrogen fuel, liquid, gasifier heat exchanger, thermal calculation, aircraft gas-turbine engine.

В настоящее время для осуществления процесса получения механической работы в двигателях транспортных средств, в том числе авиационных газотурбинных, в качестве топлива применяются углеводороды, являющиеся продуктами переработки нефти. Потребление углеводородного топлива ежегодно растет (например, из-за небывалого роста автомобилизации, наличие нескольких автомобилей в одной семье стало обычным явлением), а запасы нефти на планете не бесконечны. Поэтому переход на альтернативные виды топлива в ближайшем будущем станет острым вопросом. Кроме того, использование любого углеводородного топлива приводит к загрязнению воздушной оболочки Земли. Данная проблема касается в том числе и авиации. Хотя выбросы продуктов сгорания от авиационных газотурбинных двигателей уступают выбросам поршневых двигателей автотранспорта

примерно в 15 раз, они тоже загрязняют воздух, причем не приземный слой, а верхнюю тропосферу и нижнюю стратосферу [1].

В связи с вышеописанными причинами авиационному керосину также нужно искать альтернативы, одной из которых является водород по следующим причинам:

1) запасы водорода на планете являются фактически неисчерпаемыми, процесс получения его из воды методом электролиза является экологически чистым;

2) при сгорании водорода не образуются вредных веществ;

3) по сравнению с авиационным керосином водород имеет хорошие энергетические показатели, например, теплотворная способность водорода составляет 120 МДж/кг, в то время как этот же показатель авиационного керосина – 42,9...43,3 МДж/кг [2]. Это означает, что для получения одного и того же количества энергии, необходимого для работы авиационного газотурбинного двигателя, потребуется в 3 раза меньшее количество водорода по сравнению с керосином. Это заметная экономия топлива, что является довольно важным аспектом для гражданской авиации.

Однако, в отличие от авиационного керосина, водород – газообразное вещество, и его плотность очень мала. Если плотность авиационного керосина, являющегося жидкостью при нормальных условиях, составляет 775...840 кг/м³, то плотность водорода, представляющего собой при тех же условиях вещество в газообразном состоянии, составляет всего 0,0846 кг/м³ [2]. Это в 10000 меньше, и во столько же раз больше будет объем водорода по сравнению с объемом керосина такой же массы. В связи с этим транспортировка обычного газообразного водорода на летательном аппарате невозможна, поскольку размеры топливных баков, необходимые для этого, превышали бы во много раз размеры самолета. Поэтому для хранения и транспортировки в самолетных топливных баках плотность водорода необходимо увеличить, а это можно сделать только сжижением газа (плотность жидкого водорода при кипении равна 70,8 кг/м³). Жидкий водород кипит при температуре 20,3 К (около минус 253 °С), т.е. для обеспечения жидкого состояния водорода в баках необходимо создание именно таких температур, являющихся криогенными. Именно поэтому водородное топливо относится к одному из видов криогенного топлива, и транспортировка его в обычных условиях с применением топливных баков, размеры которых меньше размеров самолета, не представляется возможным.

В связи с необходимостью применения водорода как авиационного топлива в криогенном состоянии внедрение его в авиацию сопряжено с огромными трудностями. В первую очередь, необходима идеальная тепловая изоляция баков и специфические требования к топливной системе двигателя в связи с особыми теплофизическими свойствами жидкого водорода, его пожаро- и взрывоопасностью, а также охрупчиванием конструкционных материалов при контакте с жидким водородом. Например, невозможно обойтись обычным топливным насосом центробежного типа, необходимо применение специального турбонасосного агрегата на основе шнекоцентробежных насосов. Также необходима идеальная изоляция трубопроводов от бака до насосного агрегата, чтобы водород не успел испариться (газифицироваться) до насосов. Кроме того, подача жидкого водорода до камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя и вовсе представляет невозможную задачу. Во-первых, для удержания криогенной температуры водорода в трубопроводах топливной

системы необходима их идеальная тепловая изоляция по всей длине системы до камеры сгорания двигателя, что осуществить очень трудно. Во-вторых, даже при соблюдении данных условий всегда есть окружающая неравномерность температуры воздуха, поступающего из компрессора в камеру сгорания. Вследствие этого часть водорода на форсунках, к которым поступил более горячий воздух, испарится, на других же форсунках, с более холодным воздухом, топливо останется жидким. Подобная неравномерная подача топлива в разных фазовых состояниях может привести к нарушению процесса его сгорания. Поэтому для исключения данных явлений необходимо испарение (газификация) водорода после насосов и перед камерой сгорания, при этом также не требуется идеальная изоляция трубопроводов, поскольку переход водорода в газообразное состояние будет осуществляться в специальном устройстве – теплообменнике-газификаторе [3].

Для осуществления газификации жидкого водорода, к нему необходимо подвести теплоту, необходимую для испарения. В качестве теплоносителя, необходимого для этого, можно использовать воздух, поступающий в двигатель, а сам теплообменник установить в воздухозаборнике двигателя перед компрессором. Поскольку в воздухозаборнике происходит частичное сжатие воздуха в процессе, близком к адиабатному, и температура данного воздуха при этом возрастает, то он может отдать часть теплоты, необходимой для испарения жидкого водорода.

Корпус воздухозаборника авиационного газотурбинного двигателя представляет собой цилиндр, поэтому теплообменник-газификатор жидкого водорода необходимо расположить вдоль цилиндрической поверхности. Наиболее подходящим вариантом является конструкция теплообменного аппарата в виде теплообменной трубы 1, навитой в виде змеевика на внутреннюю поверхность корпуса воздухозаборника 2 (рис. 1). Диаметр навивки змеевика при этом примерно равен внутреннему диаметру корпуса воздухозаборника D . Витки змеевика расположены друг от друга на равном расстоянии s , называемым межвитковым шагом. Жидкий водород подается шнекоцентробежным насосом турбонасосного агрегата во внутреннее пространство трубы 1 диаметром d_1 , где кипит за счет того, что снаружи данную трубу, наружный диаметр которой d_2 , обтекает воздух, идущий через воздухозаборник в компрессор 3 и имеющий температуру, на сотни градусов превышающую криогенную температуру водорода. Движение жидкого водорода и воздуха, как видно из рис. 1, осуществляется по наиболее выгодной, с точки зрения интенсивности процесса теплопередачи, противоточной схеме. Водород при этом необходимо испарить полностью, во избежание подачи его в камеру сгорания в разных фазовых состояниях, причем кипение водорода происходит при температуре 20,3 К без дальнейшего нагрева в теплообменнике-газификаторе.

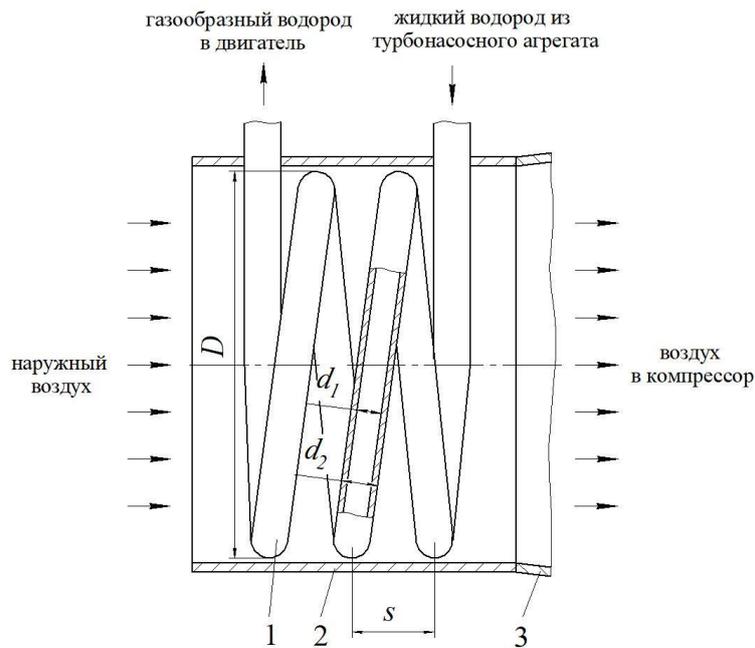


Рисунок 1 – Теплообменник-газификатор жидкого водорода: 1 – витая труба теплообменника; 2 – корпус воздухозаборника; 3 – корпус двигательного компрессора

При конструировании данного теплообменника, как и любого аппарата данного типа, в первую очередь необходимо найти необходимую для полного испарения площадь поверхности теплообмена, или, для теплообменных аппаратов с цилиндрической стенкой – минимальную для полного испарения длину теплообменной трубы. Тепловой поток в процессе теплопередачи определяется следующим образом:

$$Q = rG_{H_2}, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток, Вт; r – теплота парообразования водородного топлива, Дж/кг; G_{H_2} – массовый расход жидкого водорода, поступающего в теплообменник, кг/с [3].

Основное уравнение теплопередачи, описывающее любой процесс переноса теплоты от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их твердую стенку, для трубы, представляющей собой цилиндрическую стенку, может быть записано в следующем виде [4]:

$$Q = \pi d_1 l k \Delta T_{cp}, \quad (2)$$

отсюда искомая длина трубы теплообменника l , м:

$$l = \frac{Q}{\pi d_1 k \Delta T_{cp}}, \quad (3)$$

где d_1 – внутренний диаметр трубы, м; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); ΔT_{cp} – средний температурный напор по всей поверхности теплообмена, К.

Для противоточной схемы движения теплоносителей средний температурный напор вычисляется следующим образом [4]:

$$\Delta T_{\text{cp}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{T_2}} = \frac{(T_{\text{в1}} - T_{\text{H}_2}) - (T_{\text{в2}} - T_{\text{H}_2})}{\ln \frac{(T_{\text{в1}} - T_{\text{H}_2})}{(T_{\text{в2}} - T_{\text{H}_2})}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{в1}}$ – температура воздуха на входе в воздухозаборник, К; $T_{\text{в2}}$ – температура охлажденного воздуха на входе в компрессор, К; T_{H_2} – температура кипения водорода, К.

Для витых змеевиковых теплообменников, в которых используются криогенные теплоносители, коэффициент теплопередачи k , Вт/(м·К), определяется в соответствии с формулой [5]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{d_2}{d_1}}, \quad (5)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи внутри витой трубы (в данном случае от кипящего водорода к стенке трубы), Вт/(м²·К); α_2 – коэффициент теплоотдачи снаружи витой трубы (в данном случае от стенки воздуху, проходящему через воздухозаборник), Вт/(м²·К); d_1 – внутренний диаметр трубы (см. рис. 1), м; d_2 – наружный диаметр теплообменной трубы (см. рис. 1), м.

Величина термического сопротивления стенки теплообменной трубы не входит в формулу (5), выражение в знаменателе определяется только внешними тепловыми сопротивлениями теплоносителей. Данное допущение связано с тем, что стенки труб змеевиковых теплообменников, используемых в криогенной технике, изготавливаются из материалов с большими значениями коэффициента теплопроводности, при этом толщина стенки является малой. Поэтому термическое сопротивление стенки в расчетах пренебрежимо мало [5].

Наиболее трудным для расчета процессом является процесс теплоотдачи от кипящей криогенной жидкости стенке трубы теплообменника. При расчете количественно определяющего данный процесс коэффициента теплоотдачи α_1 нужно учитывать, что процесс кипения представляется как совокупность двух процессов с разными коэффициентами теплоотдачи [3]:

1) коэффициент α_q , Вт/(м²·К), количественно определяет теплоотдачу при пузырьковом кипении, сочетающимся с интенсивным перемешиванием пузырьками газа кипящей жидкости у стенки трубы, но при, что немаловажно, отсутствии вынужденного течения;

2) коэффициент α_w , Вт/(м²·К), количественно определяет обычный конвективный теплообмен при вынужденном (за счет воздействия насоса) течении теплоносителя в трубе.

Для расчета коэффициента теплоотдачи в процессе пузырькового кипения в большом объеме без вынужденного движения теплоносителя в трубе применима формула Лабунцова [3]:

$$\alpha_q = 0,075 \left(1 + 10 \left(\frac{\rho_z}{\rho_{\text{ж}} - \rho_z} \right)^{0,66} \right) \left(\frac{\lambda_{\text{ж}}^2 \rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}} \sigma T_{\text{H}_2}} \right)^{0,33} q^{0,66}, \quad (6)$$

где ρ_z – плотность газообразной фазы водорода при температуре кипения, кг/м³; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкой фазы водорода при температуре кипения, кг/м³; $\lambda_{\text{ж}}$ – коэффициент теплопроводности жидкой фазы водорода при температуре кипения, Вт/(м·К); σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкой фазы водорода, Н/м; $\mu_{\text{ж}}$ – динамическая вязкость жидкой фазы водорода при

температуре кипения, Па·с; q – удельный тепловой поток между кипящим водородом и стенкой трубы при пузырьковом кипении без учета движения теплоносителя, Вт/м².

Для определения коэффициента теплоотдачи α_w применимо выражение:

$$\alpha_w = \frac{\lambda_{ж}}{d_1} \left(0,023 \text{Re}_{ж}^{0,8} \text{Pr}_{ж}^{0,4} \right) \sqrt{1 + x \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}} - 1 \right)}, \quad (7)$$

где $\text{Re}_{ж}$ и $\text{Pr}_{ж}$ – критерии Рейнольдса и Прандтля для движущейся жидкой фазы водорода при кипении; x – степень сухости жидкой фазы водорода ($x = 1$, поскольку весь водород испаряется и подается в камеру сгорания в газообразном фазовом состоянии).

Критерии Рейнольдса и Прандтля при движении жидкой фазы водорода находятся в соответствии с их физическим смыслом:

$$\text{Re}_{ж} = \frac{4G_{\text{H}_2}}{\pi d_1 \mu_{ж}}, \quad (8)$$

$$\text{Pr}_{ж} = \frac{c_{рж} \mu_{ж}}{\lambda_{ж}}, \quad (9)$$

где $c_{рж}$ – удельная изобарная теплоемкость жидкой фазы водорода при температуре кипения, Дж/(кг·К).

При этом коэффициент теплоотдачи α_1 определяется геометрическим суммированием данных коэффициентов α_q и α_w , найденных в соответствии с выражениями (6) и (7):

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha_q^2 + \alpha_w^2}. \quad (10)$$

При расчете процесса теплоотдачи внутри трубы необходимо учитывать, что формула (10) применима к прямой трубе, поэтому значение полученного коэффициента теплоотдачи α_1 необходимо умножить на следующий поправочный коэффициент [4]:

$$\varepsilon = 1 + 1,77 \frac{d_1}{R_{ср}}, \quad (11)$$

где $R_{ср}$ – средний радиус змеевика, м,

$$R_{ср} = \frac{D - d_2}{2}, \quad (12)$$

где D – диаметр змеевика, м (см. рис. 1).

Для определения коэффициента теплоотдачи от стенки трубы теплообменника к охлаждаемому воздуху α_2 нужно иметь в виду, что труба данной формы является витым змеевиком с определенным шагом витков, и воздух, проходящий по воздухозаборнику, обтекает ее как однорядный пучок труб. В ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова» совместно с ЦИАМ были проведены эксперименты по поперечному обтеканию однорядного пучка расположенных друг за другом труб, в результате были получены зависимости, общий вид которых можно представить в виде следующего критериального уравнения [3]:

$$Nu = A \text{Re}^n. \quad (13)$$

Значения коэффициентов A и n при этом зависят от отношения шага витков змеевика s к наружному диаметру трубы d_2 (относительного шага витков). Их значения при разном относительном шаге витков приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов A и n в зависимости от s/d_2

s/d_2	A	n
1,25	0,073	0,695
1,6	0,08	0,69
1,75	0,083	0,69
2,0	0,093	0,69
3,0	0,083	0,692

Критерий Рейнольдса Re , входящий в формулу (13) и являющийся в данном случае единственным из определяющих критериев, применительно к течению воздуха в воздухозаборнике авиационного газотурбинного двигателя находится следующим образом:

$$Re = \frac{Vd_2}{\nu_B}, \quad (14)$$

где V – скорость воздуха, м/с; ν_B – кинематическая вязкость воздуха при средней температуре, м²/с.

Коэффициент теплоотдачи α_2 определяется после нахождения критерия Нуссельта (формула (13)):

$$\alpha_2 = \frac{Nu\lambda_B}{d_2}, \quad (15)$$

где λ_B – коэффициент теплопроводности воздуха при средней температуре, Вт/(м·К).

Вычислив коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 , в соответствии с формулой (5), можно найти коэффициент теплопередачи k и далее, зная определенный в соответствии с (4) средний температурный напор, рассчитать в соответствии с выражением (3) необходимую минимальную длину витой трубы теплообменника-газификатора.

По вышеприведенной методике при температуре воздуха на входе в компрессор $T_{в2} = 500$ К, давлении водорода 5 кгс/см² и диаметре воздухозаборника 0,95 м были проведены теоретические расчеты процесса теплопередачи в теплообменнике-газификаторе жидкого водорода, по результатам которых были построены графики зависимости минимальной длины теплообменной трубы от относительного шага витков, приведенные на рис. 2. При этом также изменялся диаметр трубы со стороны кипящего водорода (внутренний диаметр d_1) и секундный массовый расход водорода через теплообменник. Расход водорода в данном случае можно изменять, поскольку в отличие от центробежного насоса, применяемого для подачи керосина в камеру сгорания обычного газотурбинного двигателя, шнекоцентробежный насос турбонасосного агрегата может изменять частоту вращения, при этом она регулируется системой автоматического управления двигателем.

В соответствии с выражением (1) при увеличении расхода жидкого водорода возрастает значение теплового потока Q , что согласно формуле (3) приведет к росту значения минимальной длины трубы l . Но увеличение расхода жидкого водорода при постоянном по длине трубы ее внутреннем диаметре d_1 приводит к росту скорости движения водорода, увеличению числа Рейнольдса, и в соответствии с формулой (7) росту коэффициента теплоотдачи α_w . При этом

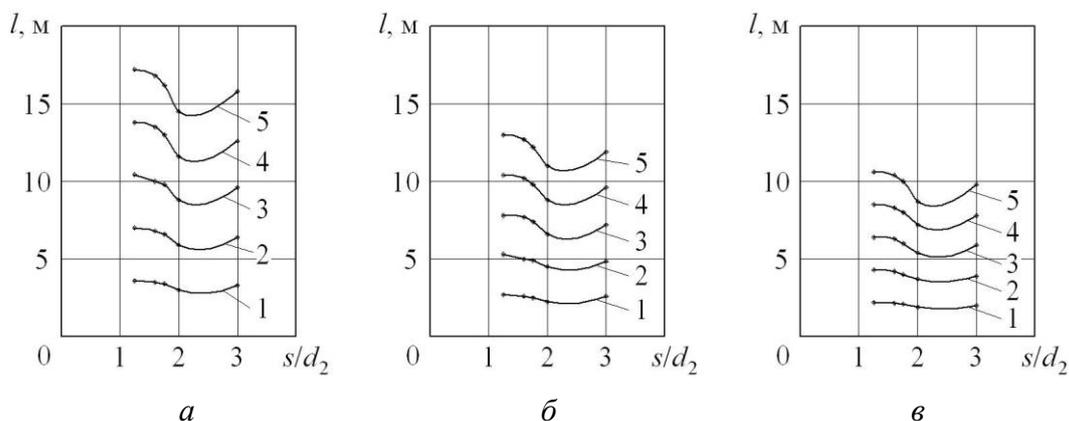


Рисунок 2 – Графики зависимости минимальной длины трубы теплообменника-газификатора l , м, от относительного шага витков s/d_2 и расхода жидкого водорода G_{H_2} , кг/с:

а) при $d_1 = 0,02$ м; б) при $d_1 = 0,03$ м; в) при $d_1 = 0,05$ м; 1 – при $G_{H_2} = 0,1$ кг/с; 2 – при $G_{H_2} = 0,2$ кг/с; 3 – при $G_{H_2} = 0,3$ кг/с; 4 – при $G_{H_2} = 0,4$ кг/с; 5 – при $G_{H_2} = 0,5$ кг/с.

увеличится коэффициент теплоотдачи от водорода к стенке трубы α_1 , а значит и коэффициент теплопередачи k , что в соответствии с формулой (3) должно уменьшать значение минимальной длины трубы. Однако в связи с прямой пропорциональной зависимостью теплового потока от расхода водорода, влияние расхода именно со стороны роста величины Q на минимальную длину трубы оказывается более значимым, чем со стороны увеличивающегося при этом не прямо пропорционально коэффициента k . В итоге при росте расхода минимальная длина трубы тоже возрастает, что видно из рис. 2. Также из рисунка видно, что увеличение значения внутреннего диаметра трубы d_1 в соответствии с формулой (3) приводит к уменьшению ее длины l .

При значении относительного шага витков s/d_2 , равному единице, витки будут касаться друг друга, что приведет к неполному обтеканию их воздухом, проходящим через воздухозаборник. При этом площадь поверхности теплообмена между воздухом и трубой теплообменника будет использована не полностью, что приведет к снижению коэффициента теплоотдачи α_2 , а значит снижению коэффициента теплопередачи k и увеличению из-за этого длины трубы l . При дальнейшем росте величины s/d_2 витки теплообменной трубы отдаляются друг от друга, условия их обтекания воздухом при этом улучшаются, что приводит к разрушению воздушными вихрями пограничного слоя, турбулизации движения около стенок трубы, соответственно росту критерия Нуссельта, а значит коэффициента теплоотдачи α_2 и, следовательно, коэффициента теплопередачи k . При этом, в соответствии с формулой (3), будет уменьшаться минимальная длина теплообменной трубы l . Из рис. 2 видно, что наименьшего значения длина трубы достигает при относительном шаге витков, равном примерно 2,5, а дальнейшее его увеличение нецелесообразно, поскольку минимальное значение длины трубы для проведения полного испарения водорода снова начинает увеличиваться. Связано это с тем, что при возрастании относительного шага расстояние между витками растет, при этом в увеличивающемся пространстве появляются зоны отрыва воздуха от поверхности трубы, что снижает коэффициент теплоотдачи α_2 и теплопередачи k .

В связи с вышеизложенным необходимо подбирать такие геометрические параметры теплообменной трубы, при которых было бы обеспечено минимальное значение ее длины

(в первую очередь относительный шаг витков s/d_2). От этого зависит длина трубы и всего теплообменника, а значит и размеры воздухозаборника и самого двигателя. При достижении необходимых параметров теплообменного процесса минимальные массогабаритные характеристики газотурбинного двигателя для авиации имеют важнейшее значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова, А.Р. Влияние авиации на окружающую среду и меры по ослаблению негативного воздействия / А.Р. Иванова // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – № 365. – С. 5-14.
2. Нечаев, Ю.Н. Силовые установки гиперзвуковых и воздушно-космических летательных аппаратов / Ю.Н. Нечаев. – Москва: Издание Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, 1996. – 213 с.
3. Панченко, С.Л. Тепловой расчет теплообменника-газификатора водородного топлива для двигателя воздушно-космического самолета / С.Л. Панченко // Вестник УГАТУ. – 2022, – Т. 26, № 3 (97). – С. 126-137.
4. Михеев, М.А. Основы теплопередачи. / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Москва: Энергия, 1977. – 344 с.
5. Техника низких температур / А.М. Архаров, К.С. Буткевич, А.Г. Головинцов, В.М. Кулаков, И.В. Марфенина. – Москва-Ленинград: Энергия, 1964. – 448 с.

REFERENCES

1. Ivanova, A.R. The impact of aviation on the environment and measures to mitigate the negative impact / A.R. Ivanova // Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia. – 2017. – No. 365. – P. 5-14.
2. Nechaev, Yu.N. Power plants of hypersonic and aerospace aircraft / Yu.N. Nechaev. – Moscow: Publication of the Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, 1996. – 213 p.
3. Panchenko, S.L. Thermal calculation of a hydrogen fuel gasifier heat exchanger for an aerospace aircraft engine / S.L. Panchenko // Bulletin of UGATU. – 2022, – T. 26, No. 3 (97). – P. 126-137.
4. Mikheev, M.A. Basics of Heat Transfer. / M.A. Mikheev, I.M. Mikheeva. – Moscow: Energy, 1977. – 344 p.
5. Low temperature technology / A.M. Arkharov, K.S. Butkevich, A.G. Golovintsov, V.M. Kulakov, I.V. Marfenina. – Moscow-Leningrad: Energy, 1964. – 448 p.

**ИСТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ИЗ ДОННОГО РЕГУЛИРУЕМОГО
ОТВЕРСТИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА****FLOW OF VISCOUS LIQUID FROM THE BOTTOM ADJUSTABLE HOLE OF A VERTICAL
PIPELINE**

Кумицкий Б.М., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Саврасова Н.А., кандидат физико-математических 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

Kumitsky B.M., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

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

Savrasova N.A., PhD in Physics and Mathematics, 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. В работе изложены результаты исследования процесса истечения вязкой жидкости из вертикально расположенной трубы сквозь круглое донное отверстие с регулируемым поперечным сечением. Считается, что жидкость представляет собой сплошную среду с некоторым центром масс и полностью заполняет полость трубопровода. В предположении ламинарного течения несжимаемой вязкой жидкости составлено уравнение, связывающее скорость движения её центра масс с высотой относительно сливного отверстия. Кроме того, получено аналитическое выражение, описывающее зависимость параметров сечения выпускного отверстия от высоты столба жидкости различной вязкости. Это даёт возможность управлять процессом практического использования методики регулируемого слива жидкости.

Ключевые слова: регулируемое истечение жидкости, вязкость, коэффициент сопротивления, степень открытия.

Abstract. The paper presents the results of the process of outflow of a viscous liquid from a vertically located pipe through a round bottom hole with an adjustable cross-section study. It has believed that the liquid is a continuous medium with a certain center of mass and completely fills the cavity of the pipeline. Assuming laminar flow of an incompressible viscous fluid, an equation has compiled that relates the speed of movement of its center of mass with the height relative to the drain hole. In addition, an analytical expression has obtained that describes the dependence of the cross-

sectional parameters of the outlet on the height of a column of liquid of various viscosities. This makes it possible to control the process of practical use of the controlled liquid drainage technique.

Keywords: adjustable fluid flow, viscosity, resistance coefficient, opening degree.

Интенсивность развития традиционных и новых отраслей современного производства, таких как гидроэнергетика, нефтедобыча, мелиорация, градостроительство и др., вызвала повышенный интерес к теоретическому исследованию истечения жидкости из резервуаров через отверстия и насадки [1-4]. Примерами таких исследований могут служить работы [5,6], предлагающие математическое описание процессов истечения идеальной и аномальной жидкостей при переменном напоре из вертикальной трубы небольшого диаметра, для которых формула Торричелли непригодна, и аналитические выражения для времени опорожнения и распределения скорости течения по поперечному сечению трубопровода, а также расхода жидкости. Показано [3], что процесс истечения аномальной жидкости из вертикального трубопровода позволяет оценить её вязкие свойства. Использование принципов реологического моделирования истечения идеальной жидкости из донного отверстия резервуара формы параболоида вращения позволяет решать проблемы водоснабжения сельскохозяйственных потребителей [4]. Для нужд нанесения различного рода покрытий на внутренней поверхности трубопровода предложена физико-математическая модель регулируемого вертикального слива [7], показано, что механизм регулируемого слива позволяет обеспечить постоянную скорость движущейся жидкости. Принципы гидродинамики используются при описании стационарного течения бурового раствора в условиях трубопроводного транспорта [6], в рамках реологической модели Шведова-Бингама получены значения эффективной и действительной вязкости бурового раствора, представляющего собой состоящую из нескольких компонентов дисперсную систему, качество которой является одним из важнейших залогов нефтебурения.

Целью настоящей работы является физико-математическое моделирование процесса опорожнения открытого с обеих сторон вертикального трубопровода, заполненного вязкой жидкостью, через нижнее круглое отверстие регулируемого сечения.

Необходимость предлагаемого описания обусловлена реализацией процессов, протекающих в работе нагнетательных нефтяных скважин [8-10]. Нагнетательные скважины используются при разработке нефтяных скважин с целью поддержания пластового давления и регулировки темпов отбора углеводородов, а также для подачи в нефтяные пласты рабочих агентов, способствующих более полному вытеснению нефти. Кроме того, нагнетательные скважины необходимо регулярно промывать для предотвращения заиливания взвешенными частицами боковой поверхности скважины. При переводе нефтяных скважин в разряд нагнетательных используется метод сорбирования, заключающийся в спуске в скважину поршня с клапаном, открывающимся при движении поршня вниз и закрывающимся при подъёме [8].

Моделирование процесса истечения предполагает следующие допущения:

- движущаяся жидкость несжимаема;
- режим течения ламинарный, без образования воронки на свободной поверхности;

– жидкость, полностью заполняющая внутренность трубы, принимается за твердое тело определенной массы с некоторым центром масс.

Процесс истечения вязкой жидкости при переменном напоре представлен на рисунке 1.

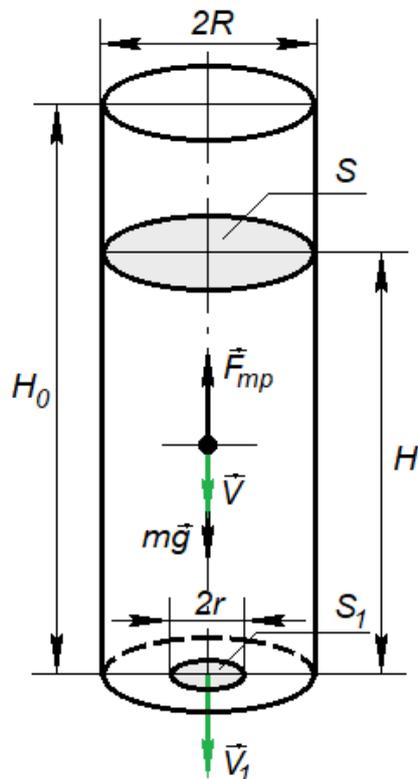


Рисунок 1 – Схема течения вязкой жидкости при опорожнении вертикального трубопровода радиуса R сквозь донное отверстие переменного радиуса r под действием сил тяжести $m\vec{g}$ и трения \vec{F}_{mp} ; \vec{V} – скорость течения в сечении S на высоте H ; \vec{V}_1 – скорость течения через отверстие сечением S_1

Условие неразрывности струи предполагает равенство объемов жидкости, протекающей в единицу времени через любое поперечное сечение трубы

$$V \cdot S = V_1 \cdot S_1, \quad (1)$$

где $S = \pi R^2$; $S_1 = \pi r^2$; R и r – радиусы трубы и регулируемого отверстия.

Для выбранных сечений справедливо уравнение Бернулли, из которого в отсутствие дополнительного давления в условиях нулевой вязкости вытекает уравнение Торричелли:

$$V_1 = \sqrt{2gH}. \quad (2)$$

Из уравнения неразрывности (1) с учетом (2) можно получить величину скорости жидкости в любом сечении трубы:

$$V = \frac{r^2}{R^2} \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (3)$$

где $\varphi = \left(\frac{r}{R}\right)^2$ – коэффициент скорости. Отметим, что формула (3) пригодна только для случая стационарного течения при отсутствии сопротивления стенок трубопровода.

Для рассмотрения течения реальной (вязкой) жидкости введём предположение о том, что жидкость, полностью заполняющую объем трубы, можно принять за твердое тело

определенной массы с некоторым центром масс, изменяющим своё положение в процессе слива жидкости. Для такого модельного представления запишем второй закон Ньютона для тела переменной массы

$$\frac{d}{dt}(mV) = F + V_1 \frac{dm}{dt}, \quad (4)$$

где V – скорость центра масс жидкости в полости трубы для текущего момента времени; m – масса жидкости, находящейся в полости трубы; $F = mg - F_c$ – результирующая сила; V_1 – скорость удалившейся массы жидкости (скорость струи); $F_c = k\rho gH$ – сила сопротивления движению жидкости; ρ – плотность жидкости; k – коэффициент сопротивления, определяемый стенкой трубы и диаметром сливного отверстия [7]. Подставив перечисленные параметры в (4), перепишем это уравнение с учётом (1) в виде:

$$V \frac{dm}{dt} + m \frac{dV}{dt} = m\mathfrak{g} - k\rho gH + V \frac{S_1}{S} \frac{dm}{dt}. \quad (5)$$

Учитывая, что $m = \rho SH = \rho H\pi R^2$ и $\frac{dH}{dt} = V$, после исключения времени и плотности из уравнения (5) получим соотношение

$$V^2 S + SHV \frac{dV}{dH} = gH(S - k) + V^2 S_1, \quad (6)$$

которое после преобразования примет вид

$$\frac{dV}{dH} = \frac{V}{H} \left(\frac{S_1}{S} - 1 \right) + \frac{(S-k)g}{VS}. \quad (7)$$

Сила сопротивления движению жидкости в трубе является следствием трения её о стенки и сопротивления задвижки регулируемого слива, поэтому коэффициент сопротивления k в уравнении (7) можно найти следующим образом: при полностью закрытой задвижке ($r = 0$) сила сопротивления F_c равна весу жидкости в трубопроводе, т.е.

$$F_c = mg = k\rho gH. \quad (8)$$

С другой стороны, сила сопротивления прямо пропорциональна давлению жидкости на стенки трубы p :

$$F_c = kp = \pi R^2 \rho gH. \quad (9)$$

Из сравнения (8) и (9) видно, что сила сопротивления при этом максимальна с коэффициентом сопротивления

$$k_{max} = \pi R^2. \quad (10)$$

При полностью открытой задвижке ($r = R$) сила сопротивления будет минимальна и равна нулю с минимальным коэффициентом сопротивления. При этих граничных условиях коэффициент сопротивления можно представить в виде

$$k = \pi(R^2 - r^2). \quad (11)$$

С учетом сопротивления со стороны боковой поверхности трубопровода параметр k в уравнении (9) будет равен

$$k = \pi(R^2 - r^2) + 2\pi RH\varphi k_1, \quad (12)$$

где k_1 – коэффициент потерь потерь на трение о боковую поверхность, площадь которой равна $S_6 = 2\pi RH$.

После подстановки (12) в (7) имеем уравнение движения жидкости в виде

$$\frac{dV}{dH} = \frac{V}{H} (\varphi - 1) + \frac{\varphi g}{V} + \frac{2gHk_1\varphi}{VR}. \quad (13)$$

Введем обозначения:

$$a = \varphi - 1; b = \varphi g; d = \frac{2k_1 \varphi g}{R}. \quad (14)$$

Решение уравнения (13) с обозначениями (14) определяется формулой [11]:

$$V = \sqrt{\frac{2bH}{1-2a} - \frac{2dH^2}{1-a}}. \quad (15)$$

Выражение для скорости (15) при $\varphi = 1$ сводится к формуле Торричелли (3).

Следует отметить, что уравнение (13) не учитывает зависимость коэффициента k_1 от вязкости и скорости движения жидкости. В ламинарном режиме, согласно [7], k_1 изменяется в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-2} и может быть представлен формулой

$$k_1 = \frac{64}{Re\varphi}, \text{ а } Re = \frac{\rho VR}{\eta} = \frac{VR}{\nu}, \quad (16)$$

позволяющей получить выражение для определения потерь на трение о боковую поверхность

$$k_1 = \frac{32\nu}{VR}. \quad (17)$$

Подстановка (17) в (13) даёт более точное уравнение движения жидкости при её сливе через регулируемое отверстие:

$$\frac{dV}{dH} = \frac{V}{H}(\varphi - 1) + \frac{\varphi g}{V} + \frac{64\nu\varphi g H}{V^2 R^2}, \quad (18)$$

которое не поддается аналитическому решению [11].

Для нахождения зависимости скорости движения жидкости в трубе от высоты её столба при различных параметрах φ необходимо использовать численные методы. Однако, если предположить, что на каком-то участке трубы $V = \text{const}$ и $\frac{dV}{dH} = 0$, то в этом случае уравнение (18) принимает вид, позволяющий оценить коэффициент скорости:

$$\frac{V}{H}(\varphi - 1) + \frac{\varphi g}{V} + \frac{64\nu\varphi g H}{V^2 R^2} = 0. \quad (19)$$

Решая (19) относительно φ , найдем закон изменения степени открытия задвижки сливного отверстия в зависимости от высоты столба жидкости, обеспечивающий стабильный слив при выбранных R и V :

$$\varphi = \frac{V^3 R^2}{V^3 R^2 + gHR^2 V - 64H^2 \nu g}. \quad (20)$$

Выражение (20) определяет закон параметрического управления задвижкой в зависимости от текущей высоты H столба жидкости при различных диаметрах трубы и вязкости жидкости. Это дает возможность построения системы управления степенью очистки внутренней поверхности ствола скважины и давлением в залегающих пластах.

При малой вязкости сливающейся жидкости на свободной поверхности образуется воронка [1,4], что свидетельствует о турбулентности режима течения. В этом случае коэффициент трения жидкости о внутреннюю поверхность трубы определяется по эмпирической формуле Альтшуля [1]:

$$k_1 = 0,1 \cdot \left(\frac{1,46k_2}{2R} + \frac{100}{Re} \right)^{0,25}, \quad (21)$$

где k_2 – коэффициент шероховатости внутренней поверхности трубы (табличная величина); Re – критерий Рейнольдса.

Заметим, что уравнение (15) дает возможность определить требования к размерам трубы, при которых принципиально возможен слив при заданном коэффициенте трения k_1 . Из

условия положительности подкоренного выражения (15) следует, что $R \geq 2k_1H_0$. Это означает, что при определенных значениях вязкости жидкость вообще не может выливаться из отверстия совместно с нестабильностью скорости по высоте столба. Об этом свидетельствуют результаты графических исследований, показанные на рисунке 2. Видно, что нестабильность скорости истечения для данных условий от высоты столба жидкости возрастает с уменьшением коэффициента вязкости.

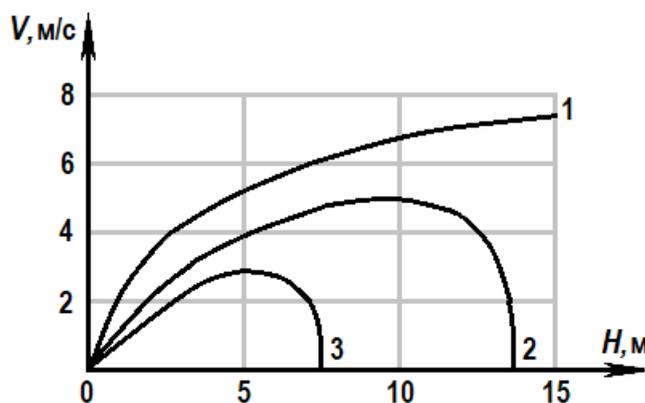


Рисунок 2 – Влияние вязкости жидкости на скорость опорожнения вертикального цилиндрического трубопровода в соответствии формулой (15) при $R = 0,1$ м, $\varphi = 0,6$ в условиях ламинарного течения жидкостей с различными коэффициентами кинематической вязкости: 1) $\nu = 10^{-5}$ м²/с; 2) $\nu = 10^{-4}$ м²/с; 3) $\nu = 5 \cdot 10^{-3}$ м²/с

Таким образом, в работе получены аналитические выражения, определяющие закон параметрического управления сечением регулируемого сливного отверстия в зависимости от высоты столба жидкости при различных размерах трубы и вязкости жидкости. Это дает возможность контролировать давление в нефтяных скважинах, а также управлять процессом очистки трубопровода сточных вод и бурового раствора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайсман, Е.М. Механика жидкости и газа. Гидравлика: Учеб. пособ. / Н.М. Вайсман, В.А. Голиков, А.А. Жарковский. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. Ун-та, 2016. – 222 с.
2. Зотов, В.М. Моделирование процесса истечения жидкости из цилиндра / В.М. Зотов, Зо Мо Аунг // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2009. – Т. 16, Вып. 1. – С. 147-148.
3. К методике определения коэффициента вязкости аномальной жидкости / Б.М. Кумицкий, С.Г. Тульская, Е.С. Аралов, Е.В. Плаксина // Химия, физика и механика материалов. – 2021. – № 4(31). – С. 94-105.
4. Кумицкий, Б.М. Использование принципов гидромеханики в решении проблем водоснабжения сельскохозяйственных потребителей / Б.М. Кумицкий, Н.А. Саврасова, Д.Н. Афоничев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 12, № 2(61). – С. 84-91. – DOI 10.17238/issn2071-2243.2019.2.84.

5. Реологическое моделирование истечения жидкости при переменном напоре из вертикального трубопровода / Б.М. Кумицкий, С.Г. Тульская, И.А. Апарина, М.А. Сарычев // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2017. – № 4(9). – С. 19-23.

6. Кумицкий, Б.М. Реологическая модель течения бурового раствора в условиях трубопроводного транспорта / Б.М. Кумицкий, Н.А. Саврасова, М.А. Долбилова // Международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию начала добычи первой башкирской нефти: Уфа, 13-14 октября 2022 г. / редкол.: Ф.Ш. Вильданов и др.; под общ. Ред. Ф.Ш. Вильданова. – Уфа: УНПЦ «Изд-во УГНТУ», 2022. – С. 319-321.

7. Скворцов, Б.В. Математическое моделирование регулируемого слива вязкой жидкости из вертикальной трубы / Б.В. Скворцов, М.И. Голикова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 288-292.

8. Воробьев, А.Е. Применение инновационных колтюбинговых технологий при разработке месторождений углеводородов / А.Е. Воробьев, В.П. Малюков, В.А. Куценко // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2014. – № 1. – С. 108-116.

9. Шматко, А.П. Оптимизация параметров гидроразрыва пластов для получения максимального эффекта / А.П. Шматко // Обогащительная техника и минералогия. – 2014. – № 3. – С. 54-61.

10. Шлеим, Г.А. Использование колтюбинга при глушении скважин / Г.А. Шлеим, А.А. Глущенко // Молодой ученый. – 2018. – № 49(235). – С. 60-61.

11. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров : определения, теоремы, формулы : перевод с английского / Г. Корн, Т. Корн ; под общей редакцией И.Г. Арамановича. – Изд. 4-е. – Москва: Физматгиз, 1978. – 832 с.

REFERENCES

1. Vaisman, E.M. Mechanics of liquid and gas. Hydraulics: Textbook. allowance / N.M. Vaisman, V.A. Golikov, A.A. Zharkovsky. – St. Petersburg: Publishing house Polytechnic Univ., 2016. – 222 p.

2. Zotov, V.M. Modeling the process of liquid outflow from a cylinder / V.M. Zotov, Zo Mo Aung // Review of Applied and Industrial Mathematics. – 2009. – Vol. 16, Iss. 1. – pp. 147-148.

3. To the method of determining the viscosity coefficient of an anomalous liquid / B.M. Kumitsky, S.G. Tulsakaya, E.S. Aralov, E.V. Plaksina // Chemistry, physics and mechanics of materials. – 2021. – No. 4(31). – pp. 94-105.

4. Kumitsky, B.M. Using the principles of hydromechanics in solving problems of water supply to agricultural consumers / B.M. Kumitsky, N.A. Savrasova, D.N. Afonichev // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. – 2019. – Vol. 12, No. 2(61). – pp. 84-91. – DOI 10.17238/issn2071-2243.2019.2.84.

5. Rheological modeling of liquid outflow under variable pressure from a vertical pipeline / B.M. Kumitsky, S.G. Tulsakaya, I.A. Aparina, M.A. Sarychev // Urban planning. Infrastructure. Communications. – 2017. – No. 4(9). – pp. 19-23.

6. Kumitsky, B.M. Rheological model of drilling mud flow under pipeline transport conditions / B.M. Kumitsky, N.A. Savrasova, M.A. Dolbilova // International scientific and practical

conference dedicated to the 90th anniversary of the start of production of the first Bashkir oil: Ufa, October 13-14, 2022 / editorial board: F.Sh. Vildanov and all; general Ed. F.Sh. Vildanov. – Ufa: UNPC “UGNTU Publishing House”, 2022. – pp. 319-321.

7. Skvortsov, B.V. Mathematical modeling of controlled drainage of viscous liquid from a vertical pipe / B.V. Skvortsov, M.I. Golikova // News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2012. – Vol. 14, No. 4. – pp. 288-292.

8. Vorobyov, A.E. Application of innovative coiled tubing technologies in the development of hydrocarbon fields / A.E. Vorobyov, V.P. Malyukov, V.A. Kutsenko // Bulletin of the Russian Peoples' Friendship University. Series: Engineering Research. – 2014. – No. 1. – pp. 108-116.

9. Shmatko, A.P. Optimization of hydraulic fracturing parameters to obtain maximum effect / A.P. Shmatko // Processing technology and mineralogy. – 2014. – No. 3. – pp. 54-61.

10. Shleim, G.A. Use of coiled tubing when killing wells / G.A. Shleim, A.A. Glushchenko // Young scientist. – 2018. – No. 49(235). – pp. 60-61.

11. Korn, G. Handbook of mathematics for scientists and engineers: definitions, theorems, formulas: translation from English / G. Korn, T. Korn; under the general editorship of I.G. Aramanovich. – Ed. 4th. – Moscow: Fizmatgiz, 1978. – 832 p.

**МОРФОЛОГИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАНОКЛАСТЕРОВ НИКЕЛЯ
В ЛАТЕНТНЫХ ТРЕКАХ****MORPHOLOGY AND DISTRIBUTION OF NICKEL NANOCCLUSERS IN LATENT TRACKS**

Омороков Д.Б., кандидат физико-математических наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Omorokov D.B., PhD in Physics and Mathematics, Senior Lecturer, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

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

Аннотация. Электрохимическим осаждением проведено заполнение протравленных ионных треков систем $\text{SiO}_2\text{-Si}$ нанокластерами никеля. Обнаружена селективность формирования нанокластеров и зависимость их морфологии от степени заполнения нанопоры. Установлено, что увеличение толщины слоя никеля еще до полного заполнения латентного трека приводит к образованию дискретных островков никеля на поверхности подложки и формированию развитого рельефа поверхности.

Ключевые слова: латентный трек, нанокластеры, нанопоры, морфология поверхности, рельеф, структура, синтез.

Abstract. The etched ion tracks of $\text{SiO}_2\text{-Si}$ systems have filled with nickel nanoclusters by electrochemical deposition. The selectivity of the formation of nanoclusters and the dependence of their morphology on the degree of filling of the nanopore have found. It has found that an increase in the thickness of the nickel layer even before the latent track is completely filled leads to the formation of discrete islands of nickel on the surface of the substrate and the formation of a developed surface relief.

Keywords: latent track, nanoclusters, nanopores, surface morphology, relief, structure, synthesis.

Актуальность выбранного направления исследований обусловлена применением в последнее время наноструктур на поверхности системы SiO_2/Si с латентными треками в микро- и нанoeлектронике. Латентные ионные треки образуются в результате воздействия пучка быстрых тяжелых ионов с большой энергией (в диапазоне от МэВ до ГэВ) внутри малого объема мишени. Новые типы спинтронных материалов и структур, которые можно использовать в магниторезистивных сенсорах, датчиках перемещений и др. [1, 2] содержат структуры с наночастицами, обладающие высокой чувствительностью к изменению

магнитных полей [3]. В этом смысле, использование гетероструктур из наночастиц Ni в слоях диоксида кремния и полиимида (структуры на основе систем SiO₂/n-Si и SiO₂/p-Si, полиимид/p-Si, полиимид/n-Si), формируемых с использованием треков быстрых тяжелых ионов, весьма перспективно, так как они создают оптимальные условия для реализации низкоразмерных структур [4]. Однако в настоящее время кинетика заполнения латентных треков металлами при электрохимическом осаждении не изучена.

Методика наполнения протравленных ионных треков нанокластерами магнитного металла, а именно никеля, описана в [5].

При формировании в протравленных ионных треках нанокластеров никеля обнаружена селективность формирования нанокластеров и зависимость их морфологии от степени заполнения нанопоры. На рис. 1 представлены АСМ сканы в режиме регистрации топографии, изометрическое представление и гистограммы высоты рельефа поверхности окисленного кремния с латентными треками, которые заполнены никелем на 50% высоты.

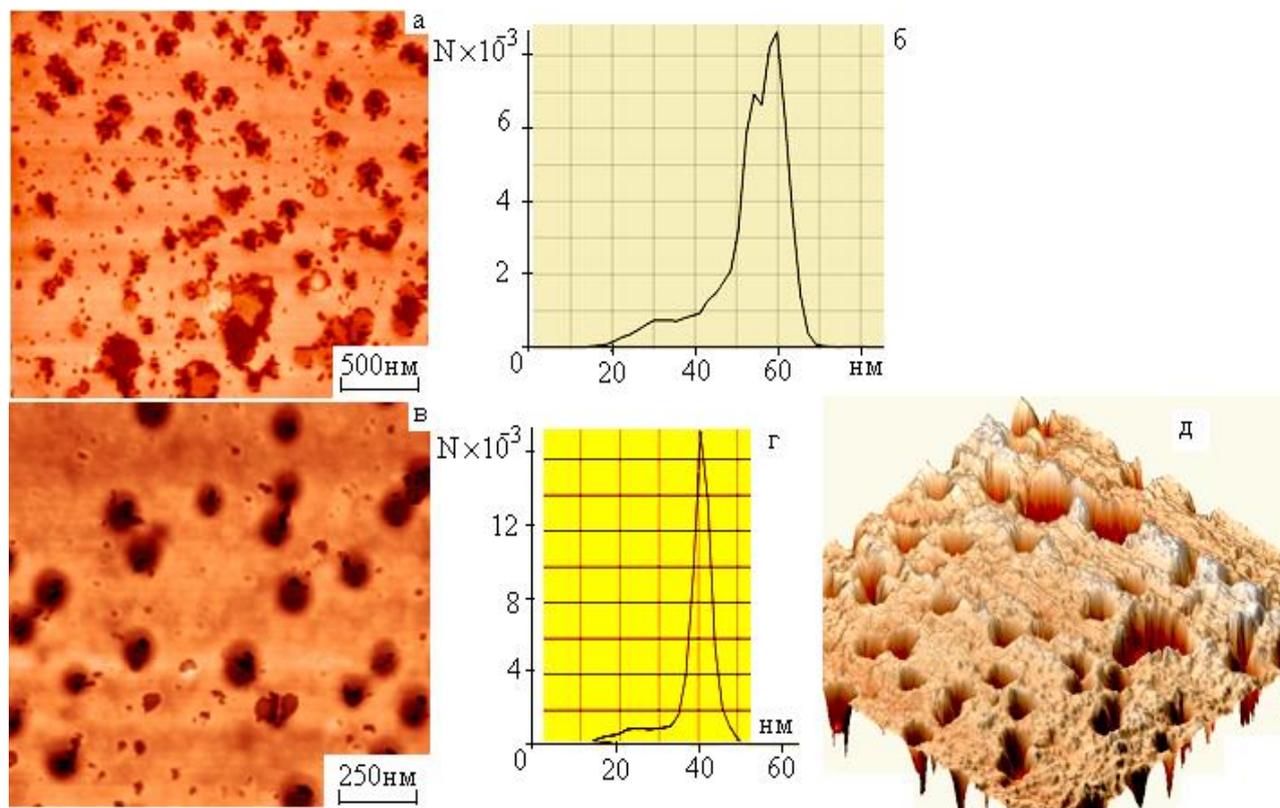


Рисунок 1 – АСМ сканы в режиме регистрации топографии (а, в), изометрическое представление (д) и гистограммы (б, г) высоты рельефа поверхности окисленного кремния с латентными треками, заполненными никелем на 50%

АСМ изображение поверхности окисленного кремния с латентными треками разрешает дисперсные топологические неоднородности (углубления) с латеральными размерами в интервале 50-200 нм и глубиной не более 80 нм.

На рис. 2 представлены результаты АСМ исследования профилей отдельных латентных в окисленном кремнии со степенью заполнения никелем 50%.

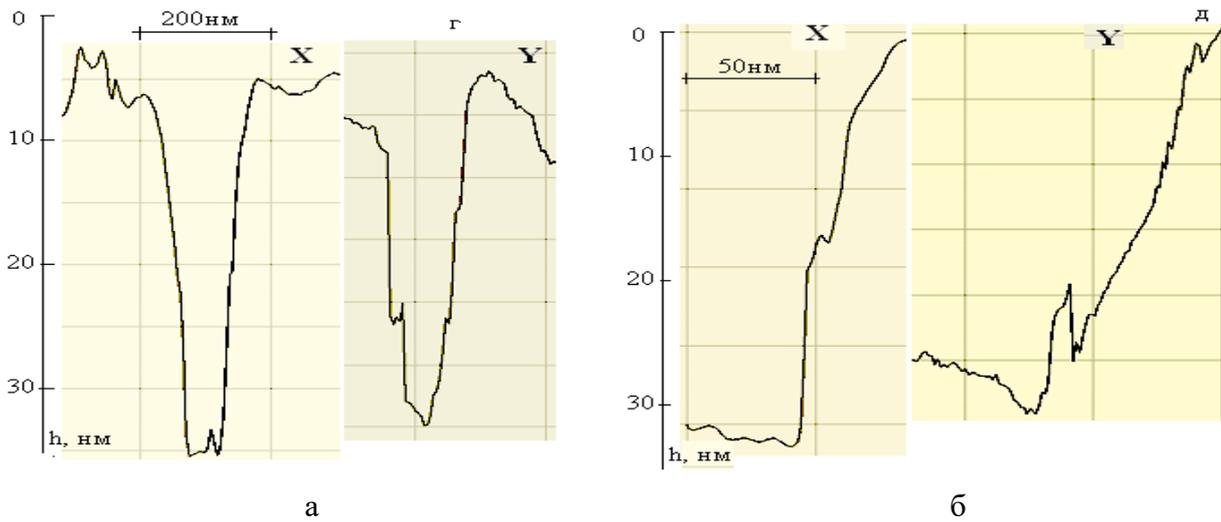


Рисунок 2 – АСМ сканы профилей двух отдельных латентных треков (а) и (б) в окисленном кремнии, заполненных никелем на 50%

Изображения, наблюдаемые при регистрации высоты рельефа, амплитуды и фазы колебания зонда АСМ не эквивалентны, что может быть следствием неоднородности физико-механических свойств поверхности. Несимметричное, мономодальное распределение высоты рельефа (рис. 1, б, г) свидетельствует о пористой морфологии поверхности и монотонном характере подъемов и спусков в пределах сканируемого участка поверхности и, следовательно, об изотропном развитии рельефа – без отвесных (резких) трещин, пор и выступов.

Анализ профилей треков (рис. 2) позволяет оценить наиболее вероятный угол наклона боковой стенки трека к плоскости поверхности. Эта величина находится в интервале $50 - 70^\circ$.

На рис. 3 представлены АСМ сканы в режиме регистрации топографии, изменения фазы колебания, изометрическое представление и гистограммы высоты рельефа поверхности окисленного кремния с латентными треками, которые заполнены никелем на 100% высоты.

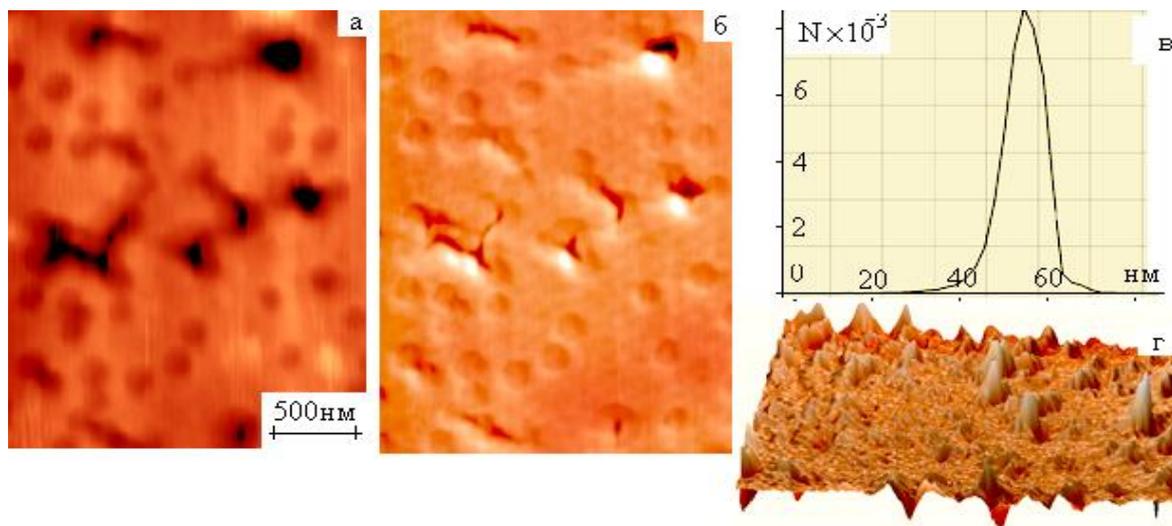


Рисунок 3 – АСМ сканы в режиме регистрации топографии (а) и фазового контраста (б), изометрическое представление (г) и гистограмма (в) высоты рельефа поверхности с латентными треками, заполненными никелем на 100%

Характерной особенностью рельефа служит одновременное наличие пор и выступов, соответственно глубиной и высотой не более 40 нм. Т. е. часть треков не полностью заполнены никелем, а на свободной поверхности кремния формируются дискретные островки металла. Латеральные размеры пор и выступов рельефа находятся в интервале размеров 150-300 нм.

На рис. 4 представлен АСМ скан, изометрическое представление и профили треков, иллюстрирующие рельеф поверхности окисленного кремния с латентными треками, заполненными никелем на 100%.

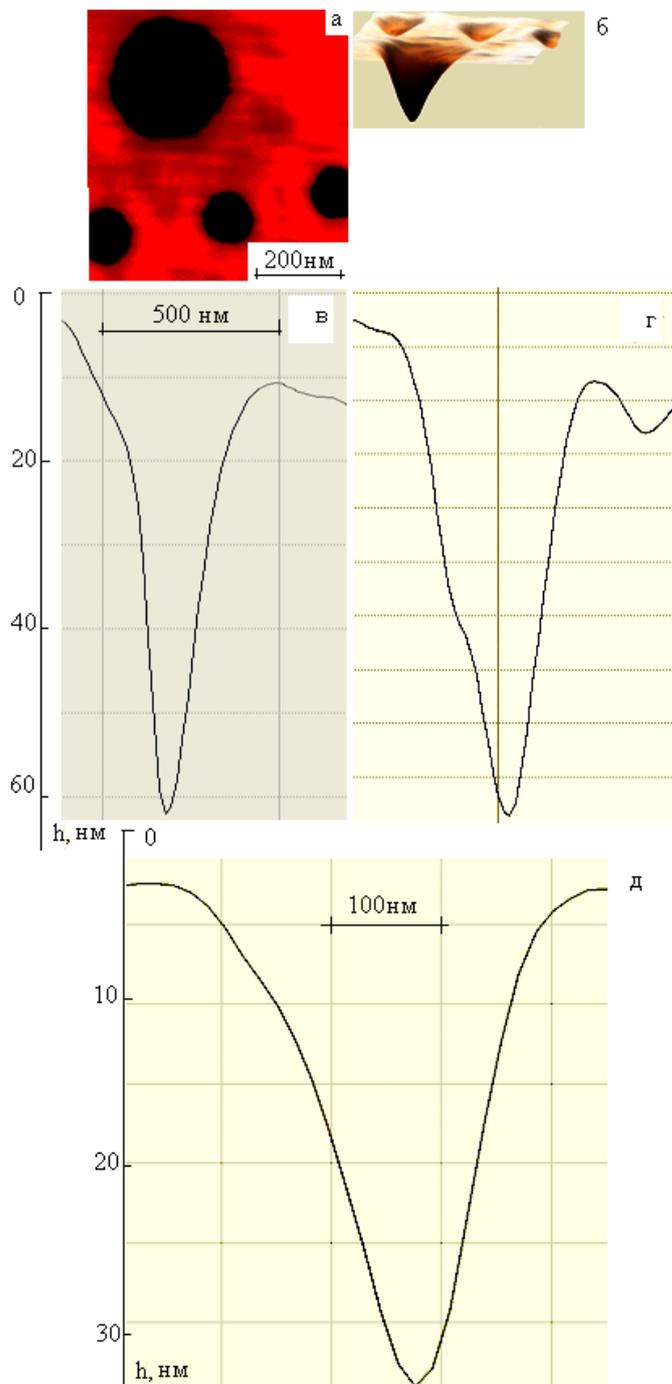


Рисунок 4 – АСМ скан в режиме регистрации топографии (а), изометрическое представление (б) рельефа поверхности окисленного кремния с латентными треками, заполненными никелем на 100%; профили треков (в-д)

Анализ профилей треков (рис. 4, в-г) позволяет оценить наиболее вероятный угол наклона боковой стенки трека к плоскости поверхности. Значение этого угла находится в интервале 20-50°.

Следовательно, увеличение толщины слоя никеля еще до полного заполнения латентного трека приводит к образованию дискретных островков никеля на поверхности подложки и формированию развитого рельефа поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The «Artificial Ostrich Eggshell» Project: Sterilizing Polymer Foils for Food Industry and Medicine / D. Fink, J. Rojas-Chapana, A. Petrov [at al.] // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2006. – Vol. 90. – P. 1458 – 1470.

2. Petrov, A.V. Novel electronic devices for nanotechnology based on materials with ion tracks / A.V. Petrov, S.E. Demyanov, D. Fink // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures (Materials of the «Nanomeeting – 2005»). – 2005. – P. 544 – 547.

3. Electrochemical Deposition of Ni and Cu onto Monocrystalline n-Si (100) Wafers and into Nanopores in Si/SiO₂ Template / Yu.A. Ivanova, D.K. Ivanov, A.K. Fedotov [at al.] // Journal of Materials Science. – 2007. – Vol. 42, No. 22. – P.9163 – 9169.

4. Наноструктуры систем Si/SiO₂/металл с треками быстрых тяжелых ионов / С.Е. Демьянов, Е.Ю. Канюков, А.В. Петров, Е.К. Белоногов// Известия РАН. Серия физическая. – 2008. – Т. 72, № 9. – С. 1262-1264.

5. Сахаров, В.Е. Формирование наноструктур на поверхности системы SiO₂/Si с латентными треками для преобразователей сигналов / В.Е. Сахаров, Д.Б. Омороков, Н.Ю. Евсикова // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 4. – С. 55-59.

REFERENCES

1. The «Artificial Ostrich Eggshell» Project: Sterilizing Polymer Foils for Food Industry and Medicine / D. Fink, J. Rojas-Chapana, A. Petrov [at al.] // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2006. – Vol. 90. – P. 1458 – 1470.

2. Petrov, A.V. Novel electronic devices for nanotechnology based on materials with ion tracks / A.V. Petrov, S.E. Demyanov, D. Fink // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures (Materials of the «Nanomeeting – 2005»). – 2005. – P. 544 – 547.

3. Electrochemical Deposition of Ni and Cu onto Monocrystalline n-Si (100) Wafers and into Nanopores in Si/SiO₂ Template / Yu.A. Ivanova, D.K. Ivanou, A.K. Fedotov [at al.] // Journal of Materials Science. – 2007. – Vol. 42, No. 22. – P. 9163 – 9169.

4. Nanostructures of Si/SiO₂/metal systems with tracks of fast heavy ions / S.E. Demyanov, E.Yu. Kaniukov, A.V. Petrov, E.K. Belonogov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2008. – Vol. 72, No. 9. – P. 1193-1195.

5. Sakharov, V.E. The formation of nanostructures on the surface of SiO₂/Si system with latent tracks for signal converters / V.E. Sakharov, D.B. Omorokov, N.Yu. Evsikova // Theory and Technology of Radio Communication. – No. 4. – P. 55-59.

**МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАБОТЫ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ФРЕЗ**

METHODS OF MATHEMATICAL MODELING OF THE OPERATION OF TILLAGE MILLS

Медведев Д.Ю., аспирант 1 курса обучения, преподаватель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Дручинин Д.Ю., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Medvedev D.Yu., 1st year postgraduate student, lecturer, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Druchinin D.Yu., PhD in Technical Sciences, Docent, Head of the Forestry Mechanization and Machine Design Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье обозначена актуальность проблемы математического моделирования процесса работы почвообрабатывающих фрез с вертикальной осью вращения. Рассмотрен метод конечных элементов в моделировании поведения почвы под воздействием почвенных ножей. Освещены методы моделирования взаимодействия почвы с рабочим органом, а также кинематика фрезы.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод конечных элементов, мощность, почвенная фреза, проектирование рабочих органов.

Abstract. The article highlights the relevance of the problem of mathematical modeling of the process of working tillage mills with a vertical axis of rotation. The finite element method in modeling soil behavior under the influence of soil knives is considered. The methods of modeling the interaction of the soil with the working body, as well as the kinematics of the milling cutter, are highlighted.

Keywords: mathematical modeling, finite element method, power, soil milling, design of working bodies

Разработка современных образцов технических средств, в том числе и в отрасли лесного машиностроения, невозможна без использования последних достижений науки и техники. Без внедрения передовых технологий и методов расчета параметров машин и почвы отечественные лесохозяйственные машины были бы менее эффективны, чем их зарубежные конкуренты. Поэтому все аспекты реализуемых технологических процессов подвергаются тщательному анализу с целью улучшения производительности и эффективности работы машин. Данный подход применим и при выполнении математического моделирования процесса работы фрезерных орудий, осуществляющих дополнительную обработку почвы в рядах и междурядьях выращиваемых культур.

Процесс дополнительной обработки почвы крайне сложен с точки зрения математического и физического анализа. Связано это с тем, что наиболее точным будет представление почвы как системы множественного числа элементов с различной массой и размером, что приводит к высокой нагрузке на вычислительные устройства. Более того, в процессе механического воздействия частички почвы могут как разрушаться на более мелкие элементы, так и слипаться в более крупные. К тому же, данные процессы осуществляются при высокой скорости вращения рабочих органов фрезы.

Рабочий процесс фрезерной почвообрабатывающей машины рассматривается исследователями по двум направлениям: либо изучается процесс непосредственного взаимодействия рабочего органа, представляемого как система простых фигур, чаще всего треугольников («полигонов», если мы говорим о 3D-моделировании), с почвенной средой, либо исследуется кинематика процесса, взаимное влияние ножей фрезы и почвы друг на друга.

Как было сказано выше, наиболее распространенный и точный способ моделирования поведения почвы – это представление её в виде системы множества объектов, взаимодействующих друг с другом и с рабочими органами машины. Такой метод получил название метод конечных элементов. Согласно статье [1], взаимодействие ножей почвенной фрезы с грунтом представляет собой проблему нахождения расстояния r_b от поверхности рабочего органа до поверхности некоторого элемента почвы. Силу, действующую со стороны ножа на частицу грунта, можно определить по формуле:

$$F = c \cdot r_b \cdot n - kv, \quad (1)$$

где n и v – векторы скорости взаимодействия рабочей поверхности и элемента почвы; c и k – коэффициенты жёсткости и вязкости взаимодействия [1].

Трудоёмким этапом при моделировании является составление алгоритма расчёта сил, действующих со стороны рабочего органа на элементы почвы и вызывающих её деформацию и деление на отдельные частицы. Необходимо производить расчёт суммарной силы сопротивления со стороны почвенных частиц на рабочие поверхности почвообрабатывающих машин при их работе. Состояние каждого i элемента можно описать шестью переменными:

- координатами его центра (x_i, y_i, z_i) ;
- составляющими его скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) [1].

Согласно проведенным исследованиям [1] взаимосвязь частиц почвы между собой имеет вязкоупругий характер. В связи с этим при разработке математической модели необходимо учитывать вязкость и упругость обрабатываемой почвы. Разделение элементов при воздействии рабочих органов приводит к тому, что взаимодействие данных частиц почвы становится настолько мало, что его можно не учитывать при расчетах. Это позволяет определить изначальное состояние почвы и её способность к разделению на комья (фрагментации) [1]. Взаимоупругое взаимодействие частиц почвы легко представить при помощи теоремы Пифагора и рис. 1, взятого из источника [1].

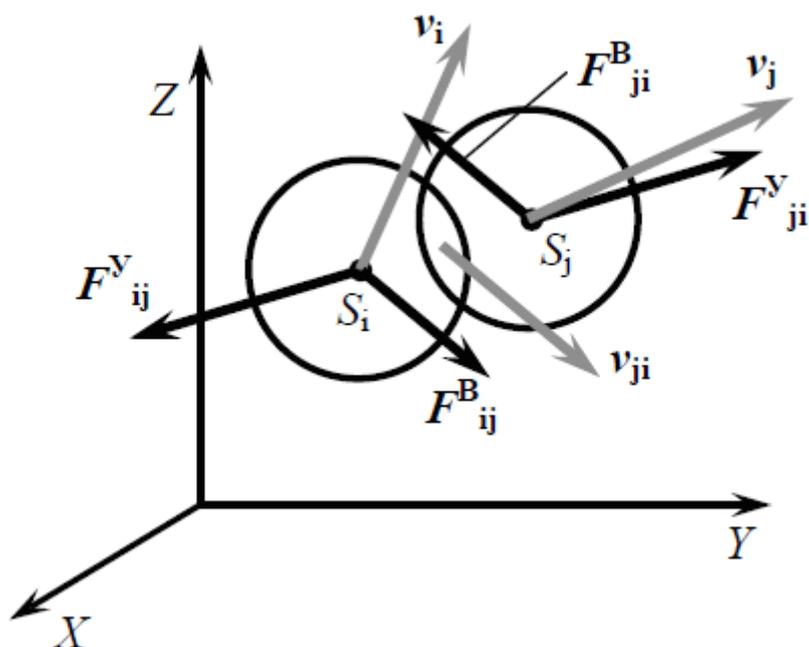


Рисунок 1 – Вязкоупругое взаимодействие двух частиц почвы

Чаще всего объекты системы представляют в виде крупных фрагментов (комьев, пластов) с целью сокращения вычислений, потому что в этом случае можно не учитывать вращательное движение частиц.

Движение шарообразных объектов системы в рамках разработки математической модели рассматривается в прямоугольном параллелепипеде с размерами $L_X \times L_Y \times L_Z$ (рис. 2). При моделировании необходимо расположить элементы системы внизу параллелепипеда в несколько слоёв, тем самым моделируя структуру почвы. Вследствие чего производится встряска и усадка под действием силы тяжести. Движение почвенной фрезы в данной модели считают параллельным оси ОУ [1]. По словам авторов, данная методика моделирования позволяет рассчитывать математические модели работы любых сходных по технологическому процессу машин, в т.ч. почвенных фрез с вертикальной осью вращения [1].

Для моделирования поверхности рабочих органов почвенных фрез их представляют в виде совокупности треугольников в количестве от 10^2 до 10^3 , которые совершают вращательное и поступательное движение в пространстве. При контакте треугольника с частицей грунта между ними возникают упругие силы отталкивания и притяжения, а также силы сухого и вязкого трения [2]. Со стороны рабочих органов на почву идут силы, изменяющие их траекторию и скорость движения, а силы воздействия со стороны частиц почвы позволяют рассчитать сопротивление движению рабочего органа и, исходя из этого, потребляемую мощность почвенной фрезы. Кроме того, такой способ моделирования даёт возможность рассчитать обратные процессы, например, вращение дисковой батареи под действием набегающего потока почвы [2].

Для определения сил взаимодействия требуется найти точку контакта частицы почвы с треугольником. Условно точки контакта можно разделить на 3 типа: контакт с внутренней частью треугольника, контакт с ребром треугольника и контакт с вершиной треугольника. Следующим шагом идет расчет величины упругой силы отталкивания и расчет её вектора.

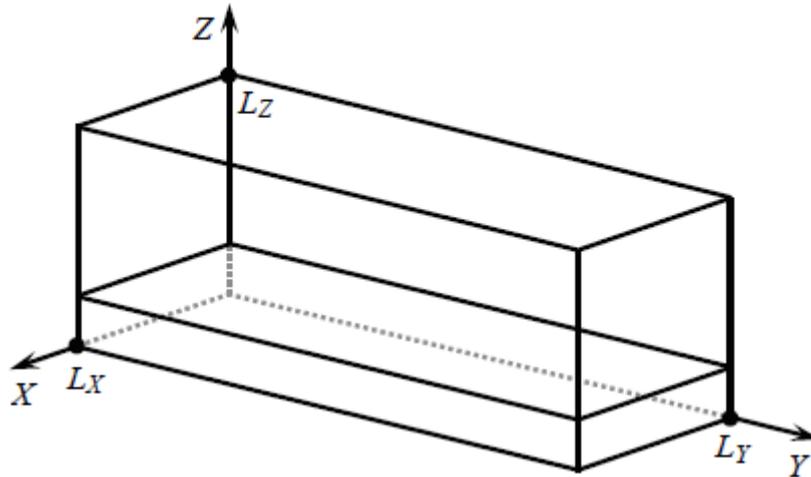


Рисунок 2 – Область отслеживания движения

Проектирование рабочих органов почвенных фрез во всех случаях должно включать в себя обязательное построение траектории движения их режущей кромки [3].

Движение рабочих органов почвенных фрез считается сложным, состоящим из:

- а) вращательного движения вокруг оси агрегата;
- б) поступательного движения относительно почвы.

Согласно исследованиям, проведенным Акимовым А.П., геометрия фрезерного ножа определяется радиусом фрезы r , углом установки ножа γ и длиной ножа L . Удобно ввести безразмерную длину ножа $\mu = L/r$ и безразмерное расстояние от точки крепления ножа к ступице фрезы до оси ее вращения $\rho = r_0/r$, которое выражается через параметры μ и γ (рис. 3):

$$\rho = (1 - \mu^2 \sin^2 \gamma) \cdot 1/2 - \mu \cos \gamma . \quad (2)$$

Нож почвенной фрезы разрезает верхний слой грунта, совершая плоскопараллельное движение в вертикальной плоскости. В плоскости координат XZ с центром O на оси вращения фрезы, равномерно движущейся вместе с ней, положение ножа задается углом его отклонения от направления поступательного движения машины α . Скорость резания почвы, переменная по лезвию, определяются положением мгновенного центра скоростей фрезы, находящегося в точке C(0; a), $a = r/\lambda$ [4].

На произвольный бесконечно малый элементарный участок режущей части лезвия длиной ds , прилегающий к точке M(x; z) лезвия, действует элементарная сила сопротивления резанию dR , направленная противоположно вектору \vec{v} абсолютной скорости этой точки (рис. 3), поскольку, угол, составляемый вектором с внешней нормалью к ножу, меньше угла трения почвы о сталь. Величина этой силы равна $dR = Q \times ds$, где Q – средняя удельная сила резания, приходящаяся на единицу длины лезвия и определяемая экспериментально [4].

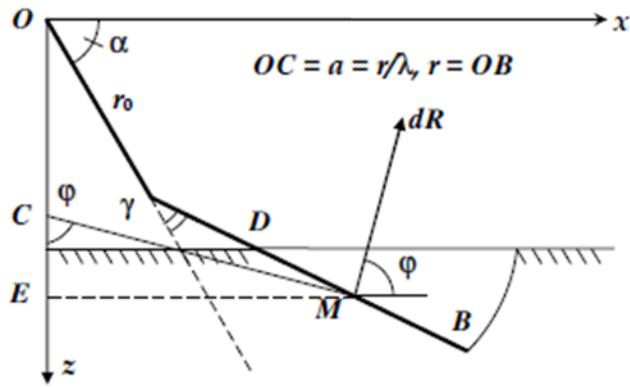


Рисунок 3 – Схема к определению геометрических параметров ножа фрезы

В этом случае проекции равнодействующих сил на плоскости XZ будут вычисляться по формулам:

$$R_x = Q \int_{BD} \cos \varphi ds, \quad R_z = -Q \int_{BD} \sin \varphi ds, \quad (3)$$

где φ – угол, образуемый вектором dR с положительным направлением оси Ox.

Мощность, расходуемая на резание почвы, равна общей расходуемой мощности минус мощность движущей силы, потраченная на перемещение фрезерного ножа:

$$W = -(M * \omega - R_x * V_0) = -QrV_0 \left(\frac{M}{Qr^2} \right) * \lambda - R_x / Qr. \quad (4)$$

Силовые характеристики ножа почвенной фрезы, входящего в грунт первым, замечательны с практической точки зрения, поскольку угол в них принимается максимальным, значения нагрузок являются наибольшими из всех возможных, а длина режущей части лезвия ножа $l(\alpha, \xi) \times r$ определяется относительно просто. Аппликата точки D, лежащей на поверхности поля, равна $z = r - h = r(1 - \xi)$, а расстояние от этой точки до конца лезвия ножа, точки B, равно длине режущей части ножа $l \cdot r$ [5].

Угол установки фрезерного ножа определяется по формуле

$$\gamma \leq \left(\frac{1 - \mu^2 - (1 - \xi)^2}{2\mu(1 - \xi)} \right). \quad (5)$$

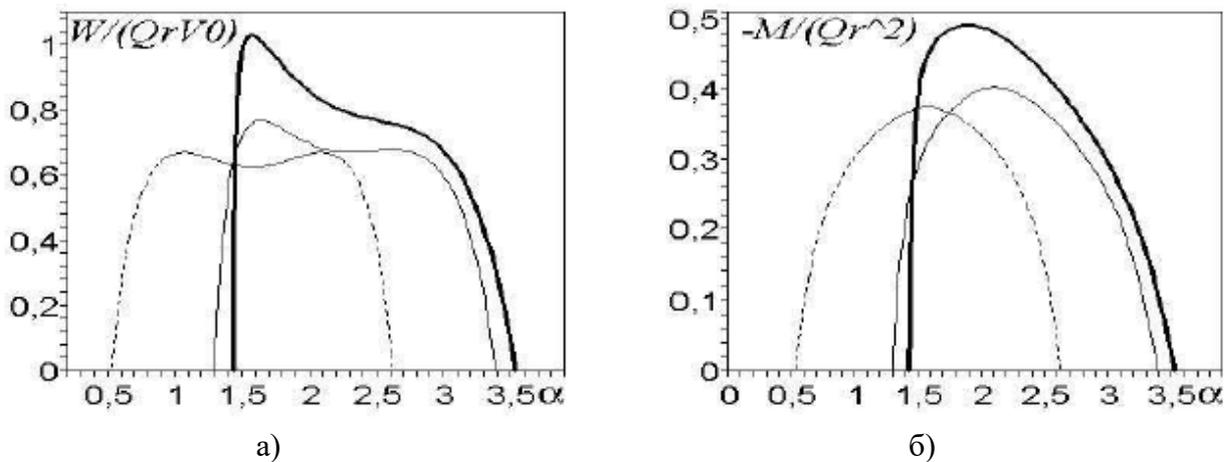


Рисунок 4 – Графики зависимости МСР(а) и ССР(б) от величины угла резания

На рис. 4 представлены графики безразмерных проекций результирующей силы сопротивления резанию (ССР), безразмерной результирующей мощности сопротивления

резанию (МСП) и безразмерной мощности в зависимости от угла α для трех значений угла установки ножа для относительного заглубления $\zeta = 0,5$, кинематического коэффициента $\lambda = 3$ и безразмерной длины ножа $\mu = 0,8$. Графики, соответствующие значению угла $\gamma = 0$, изображены пунктирной линией; значению $\gamma = 60^\circ$ – тонкой сплошной линией; а значению $\gamma = 80^\circ$ – толстой сплошной линией [5].

Из представленных графиков следует, что с увеличением угла установки ножа происходит сдвиг всех графиков вправо, экстремальные значения α соответствующих функций по абсолютной величине возрастают. Как следует из рис. 4, а проекция R_x является неотрицательной, то есть горизонтальная компонента силы сопротивления резанию является для фрезы движущей силой. Вертикальная проекция ССР для определенного промежутка углов поворота ножа отрицательна (рис. 4, б), и, значит, вертикальная компонента ССР является для этих значений α выглубляющей фрезу нагрузкой, а при больших значениях α эта проекция положительна, и компонента сопротивления резанию является заглубляющей фрезу силой. Поскольку МСП всегда является неположительной (рис. 4, а), то она тормозит вращение фрезерного барабана и для преодоления мощности сопротивления резанию необходимо прикладывать к ней неотрицательный момент вращения, равный абсолютной величине момента сопротивления резанию. Из рис. 4, б следует, что мгновенная мощность, расходуемая на разрезание почвы, является неотрицательной функцией угла поворота ножа α . Она является наименьшей для угла установки фрезерного ножа $\gamma = 0$ [5].

На сегодняшний день задача математического моделирования процесса работы почвенной фрезы остаётся актуальной. Несмотря на то, что математическая сторона обработки почвы довольно глубоко изучена, имеются некоторые «белые пятна». Связано это с тем, что современные вертикальные почвенные фрезы имеют более сложную конфигурацию ножей, а рабочий орган совершает сложное движение, что вызвано необходимостью уводить его при контакте со стволиком растения с целью исключить вероятность нанесения вреда дереву или саженцу. Требуется провести дополнительные исследования и математические расчеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попиков, П.И. Методика моделирования лесной почвы при взаимодействии с рабочими органами лесохозяйственных машин / П.И. Попиков, Д.Ю. Дручинин, Н.А. Шерстюков // Resources and technologies. – № 3.– С. 1-12.
2. Лысыч, М.Н. Компьютерное моделирование процесса обработки почвы рабочими органами почвообрабатывающих машин / М.Н. Лысыч // Компьютерные исследования и моделирование. – 2020. – № 3. – С. 607-627.
3. Кинематика ротационных почвообрабатывающих машин / С.В. Белоусов, С.И. Камбулов, В.Б. Рыков, Б.В. Туровский // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2023. – № 1 (69). – С. 509-519.
4. Акимов, А.П. Математическая модель взаимодействия фрезерного ножа с почвой / А.П. Акимов, Ю.В. Константинов, Б.В. Туровский // Вестник Казанского ГАУ. – 2017. – № 4 (46). – С. 67-71.

5. Мисиров, М.Х. Обоснование конструктивных элементов рабочих органов почвообрабатывающих фрез / М.Х. Мисиров, А.А. Егожев, Н.А. Алиев // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. – 2023. – № 3(41). – С. 113-122.

REFERENCES

1. Popikov, P.I. Methodology for modeling forest soil in interaction with the working bodies of forestry machines / P.I. Popikov, D.Yu. Druchinin, N.A. Sherstyukov // Resources and technologies. – No. 3. – P. 1-12.

2. Lysych, M.N. Computer modeling of the process of soil cultivation by working bodies of soil-cultivating machines / M.N. Lysych // Computer research and modeling. – 2020. – No. 3. – P. 607-627.

3. Kinematics of rotary tillage machines / S.V. Belousov, S.I. Kambulov, V.B. Rykov, B.V. Turovsky // News of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: science and higher professional education. – 2023. – No. 1 (69). – P. 509-519.

4. Akimov, A.P. Mathematical model of the interaction of a milling knife with soil / A.P. Akimov, Yu.V. Konstantinov, B.V. Turovsky // Bulletin of the Kazan State Agrarian University. – 2017. – No. 4 (46). – P. 67-71.

5. Misirov, M.Kh. Justification of the structural elements of the working bodies of soil-cultivating mills / M.Kh. Misirov, A.A. Egozhev, N.A. Aliyev // News of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokova. – 2023. – No. 3(41). – P. 113-122.

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ОБЛАКА АММИАКА ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТРУБОПРОВОДА**
SOFTWARE FOR MODELING THE SPREAD OF AN AMMONIA CLOUD DURING
PIPELINE DEPRESSURIZATION

Кочетова Ж.Ю., доктор географических 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

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

Внукова С.В., кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Тронин А.Л., начальник кафедры ФГКВБОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

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

Shishkin A.V., postgraduate student, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Vnukova S.V., PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Tronin A.L., Head of the Department, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Аннотация. В статье приведены результаты расчета токсичных зон распространения облака аммиака, выполненные с применением компьютерного обеспечения АЛОНА. Расчеты проведены для аварийной ситуации, сложившейся в Воронежской области при разгерметизации аммиакопровода «Тольятти-Одесса» в 2015 году. Представлен сравнительный анализ расчетных и реальных данных распространения токсичного облака. Сформулированы основные ограничения использования программного обеспечения.

Ключевые слова: моделирование распространения АХОВ, аварийно химически опасные вещества, аммиак, АЛОНА, аммиакопровод, чрезвычайные ситуации

Abstract. The article presents the results of calculating the distribution zones of the ammonia cloud, performed using the ALOHA computer software. Calculations were performed for the emergency situation in the Voronezh region during the depressurization of the Tolyatti-Odessa ammonia pipeline in 2015. A comparative analysis of calculated and real data on the spread of a toxic cloud has been carried out. The main limitations of using the software are formulated.

Keywords: modeling of the spread of toxicants, emergency chemically hazardous substances, ammonia, ALOHA, ammonia pipeline, emergencies

Среди чрезвычайных ситуаций техногенного характера аварии на химически опасных объектах занимают одно из важнейших мест. Аварии на таких предприятиях характеризуются большим радиусом поражения и тяжестью своих последствий. По статистике аварии на объектах химической промышленности чаще всего происходят по причинам отказа оборудования, ошибочных действий персонала, внешних воздействий природного и техногенного характера, разрыва хранилищ. В последнее время возросла угроза террористических актов. Нередко аварии сопровождаются гибелью людей как на самих предприятиях, так и на масштабных территориях, прилегающих к химически опасным объектам [1].

Прогнозу распространения аварийно химически опасных веществ (АХОВ) от источников выбросов посвящено немало научных работ. Построены математические модели распространения первичных облаков токсикантов от различных источников, базирующиеся в основном на уравнениях массопереноса и требующие знания большого количества параметров [2-4]. Эти модели, несомненно, представляют научный интерес, однако они не применимы на практике, когда требуется мгновенное принятие решений для предотвращения развития чрезвычайных ситуаций. Существуют эмпирические модели для прогноза переноса АХОВ, точность которых определяется привязкой к географическим и климатическим условиям, что в значительной степени ограничивает их широкое применение на практике [5].

В связи с растущими угрозами, связанными с авариями на химически опасных предприятиях, актуальным становится вопрос о разработке новых подходов к быстрому реагированию и устранению последствий распространения АХОВ. Эксперты в области управления рисками рекомендуют использовать и развивать существующие компьютерные инструменты, позволяющие достигать большей точности и скорости предупредительных мероприятий. К таким инструментам относится общедоступная программа АЛОНА (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), которая позволяет довольно точно при наличии минимальных исходных данных проводить оценку развития возможных сценариев распространения облака АХОВ при их утечках или залповых выбросах в результате взрывов, а также оценивать пожарные риски [6]. В статье приводится краткое описание возможностей этой программы и дается оценка адекватности заложенной в нее модели на примере аварийной ситуации, возникшей при разгерметизации фланцевого соединения на аммиакопроводе в Терновском районе Воронежской области в июне 2015 г. [7].

К возможным причинам этого чрезвычайного происшествия относят ветхость тридцатилетней трубы аммиакопровода «Тольятти-Одесса» и диверсию. В результате аварии из населенного пункта Липяги был эвакуирован 771 человек, из них 154 – дети; один человек госпитализирован с острым отравлением. Всего было разлито ~ 5 т аммиака. Замеры концентрации аммиака в воздухе проводили в радиусе 20 км от источника утечки. Численных результатов этих измерений в открытых источниках нет, но известно, что в день аварии содержание вредных веществ в атмосфере и почве села Липяги превышало нормативы в десятки раз, на расстоянии 20 км от источника повышенного содержания аммиака в воздухе не было. Из-за осевшего на землю гидроксида аммония в радиусе 5 км от места аварии наступила «аммиачная осень» – растения пожелтели. В реке Сухой Карачан погибла рыба.

Таблица 1 – Алгоритм использования программы АЛОНА на примере оценки зон заражения местности при разгерметизации аммиакопровода в Воронежской области

Этап	Окно программы	Параметр	Комментарии
1	Локация: - высота над уровнем моря; - северная широта; - восточная долгота; - смещение стандартного времени на GMT	Пос. Народное, РФ - 114 м; - 51°34'33"; - 41°49'36"; - (-3) ч	Выбирается точка на карте, где произошла авария. В программе, например, Google Maps для этой точки автоматически определяются параметры локации.
2	Выбор чистого химического вещества или раствора	Аммиак	В отдельном диалоговом окне для выбранного вещества представляются физико-химические и токсикологические характеристики.
3	Климатические и географические условия: - скорость ветра; - направление ветра; - высота измерения скорости ветра над землей; - характеристика рельефа; - облачность; - температура воздуха; - стабильность атмосферы; - инверсия воздуха или ее отсутствие; - влажность воздуха	- 4 м/с; - с северо-востока; - 3 м; - открытая местность; - переменная, 5 баллов; - (+27) °С; - класс D; - инверсии нет; 66 % относит.	Учитывается тип подстилающей поверхности (почвы, снеговой покров, вода); шероховатость поверхности (ровная поверхность, лес, городская застройка и т.п.). При расчетах учитывается стабильность атмосферы, которая главным образом зависит от количества поступающей солнечной радиации. Всего существует 6 классов стабильности от А (очень нестабильная в солнечные дни) до F (ночное время). На изучаемой высоте распространения аммиачного облака (до 100 м) инверсией атмосферного воздуха можно пренебречь.
4	Мощность источника: - тип источника; - единицы измерения утечки; - скорость утечки; - высота источника испарения над уровнем земли	- непрерывный; - тонны сжиженного аммиака; - 500 кг/ч; - 0 м	Важно учитывать агрегатное состояние перекачиваемого вещества. В трубопроводе «Тольятти-Одесса» аммиак находится в виде жидкости с нормальной температурой +4 °С и давлением до 35 атм.

Программное обеспечение АЛОНА рассчитывает границы зон с разной степенью токсической опасности при выбросах более 900 различных АХОВ. Библиотека токсикантов пополняется с каждой новой версией программы. Возможно внесение в библиотеку физико-химических свойств интересующих токсикантов и проведение расчетов. Для оценки зон в «сжатые сроки» необходимо поэтапно ввести в соответствующие диалоговые окна программы параметры, приведенные в табл. 1.

На последнем этапе программа отображает распространение облака аммиака и ранжирует зоны загрязнения воздуха по уровню опасности (рис. 1).

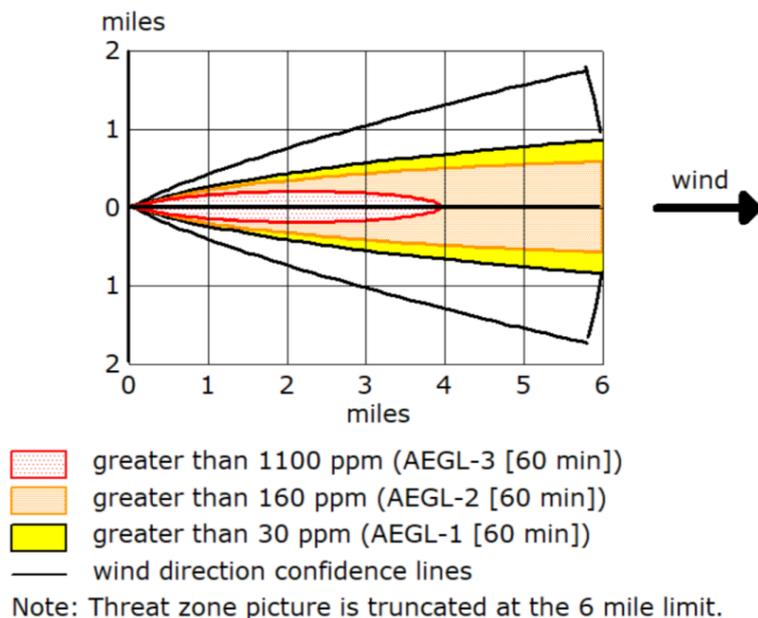


Рисунок 1 – Окно программы ALOHA для отображения токсичных зон и распространения аммиачного облака при утечке

Из рис. 1 следует, что чрезвычайно опасная зона заражения аммиаком находится на расстоянии до 4 миль (6,4 км) по преобладающему направлению ветра от источника утечки. В этой зоне содержание аммиака в воздухе составляет 1100 ppm или 684,5 мг/м³. С учетом того, что предельно допустимая концентрация аммиака в воздухе равна 20 мг/м³, норматив превышен в ~ 34 раза. При этом концентрация аммиака в воздухе, вызывающая отек легких, находится на уровне 700 мг/м³ [8].

Вторая и третья по степени опасности зоны заражения территории аммиаком находятся от источника на расстоянии 6 миль (9,7 км). Здесь содержание аммиака в воздухе составляет 160 ppm (99,5 мг/м³) и 30 ppm (18,7 мг/м³). Эти зоны характеризуются большим сектором распространения, составляющим ~ 3,2 км на максимальном удалении от источника.

При наложении зон распространения аммиачного облака от места утечки на карту Терновского района установлено, что под чрезвычайно опасное заражение попадают сельскохозяйственные угодья, река Сухой Карачан, часть поселения Народное, в большей степени населенный пункт Липяги (рис. 2).

Результаты моделирования распространения аммиачного облака при разгерметизации трубопровода соответствуют фактическим данным, опубликованным в открытых источниках. Однако при использовании рассматриваемого программного обеспечения для моделирования развития чрезвычайных ситуаций следует учитывать следующие аспекты:

1) расчет зон загрязнения территории АХОВ в программе ALOHA производится максимум для 1 часа. Для получения динамичной картины распространения облака необходимо обновлять данные на этапах 2 и 3 представленного в табл. 1 алгоритма;

2) программа не предусматривает моделирование распространения вторичного облака АХОВ, которые в большинстве своем взаимодействуют с водой из воздуха и оседают на удалении от источника выброса. При высоком содержании токсикантов в осевшем на поверхность земли облаке АХОВ заражают поверхностные почвы, фильтруются вглубь до геохимических барьеров. При изменении метеорологических условий происходит эмиссия АХОВ из почв в течение длительного времени, формируется вторичное загрязняющее облако, которое по своей опасности может не уступать первичному [9];

3) АЛОНА не учитывает химические превращения веществ в воздухе;

4) возможен ввод только преобладающего направления ветра и его неизменной в течение исследуемого времени скорости. Однако известно, что реальная зона заражения может иметь неправильную (фестончатую) форму, так как скорость и направление ветра могут изменяться несколько раз за 1 ч [8];

5) возможно моделирование либо для открытых ровных поверхностей, либо для территорий с застройками и лесными массивами, при этом высота и плотность препятствий не учитываются.

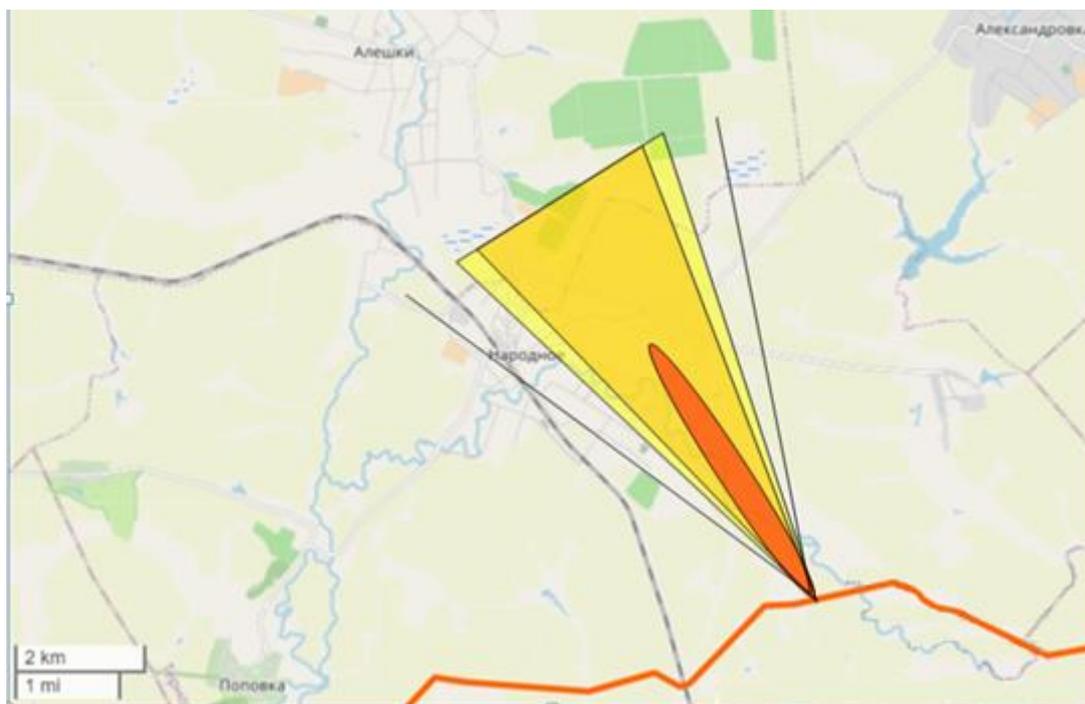


Рисунок 2 – Моделирование распространения аммиачного облака от источника утечки на территории Терновского района Воронежской области в июне 2015 г.

Таким образом, программное обеспечение АЛОНА позволяет оценить с довольно высокой достоверностью распространение первичного облака АХОВ в первые минуты после аварии. Для моделирования процесса развития чрезвычайной ситуации необходим минимальный набор параметров, который всегда есть в открытом доступе или уже содержится в библиотеке АЛОНА. Главными достоинствами программы являются оперативность получения информации, простой интерфейс и свободный доступ для широкого круга пользователей Интернет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокадаров, С.А. Анализ причин аварий на производстве, связанных с выбросом аварийно химически опасных веществ / С.А. Бокадаров, М.А. Гудков, А.Б. Емельянов, О.С. Бокадарова // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2017. – Т. 1, № 8. – С. 491-498.
2. Галеев, А.Д. Динамика формирования взрывоопасного облака при аварийном выбросе смеси сжиженных углеводородных газов в атмосферу / А.Д. Галеев, Е.В. Старовойтова, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 3. – С. 130-135.
3. Старовойтова, Е.В. Моделирование и оценка последствий аварийного выброса сжиженного аммиака / Е.В. Старовойтова, А.Д. Галеев, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 13. – С. 175-179.
4. Базарский, О.В. Модель испарения капель керосина в атмосфере и загрязнения грунтов приаэродромной территории / О.В. Базарский, Ж.Ю. Кочетова // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 64-71.
5. Kotchetova, Z.Y. Rapid assessment of soil pollution with kerosene using a carbon-nanotube-based / Z.Y. Kotchetova, O.V. Bazarsky, T.A. Kuchmenko // Moscow University Chemistry Bulletin. – 2017. – Vol. 72, № 1. – P. 63–68.
6. Применение программного обеспечения АЛОНА в оценках пожарного риска / Ж. Саласар Норьега, А. Чибас Кастаньера, А.В. Краснов [и др.] // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2019. – № 4. – С. 56-70.
7. Сайт РИА Воронеж. Авария на воронежском аммиакопроводе. Почему произошло ЧП и как избежать его повторения? – 30.07.2015. – URL: <https://riavrnr.ru/news/avariya-na-voronezhskom-ammiakoprovode-pochemu-proizoshlo-chp-i-kak-izbezhat-ego-povtoreniya/> (дата обращения 01.04.2024).
8. Методические рекомендации № 24. Медицинские аспекты ликвидации аварий, вызванных некоторыми химически опасными веществами. – Москва : НИИ Скорой помощи им. Н.В. Склифосовского, 2008. – 24 с.
9. Кочетова, Ж.Ю. Экология почв военных полигонов / Ж.Ю. Кочетова, О.В. Базарский, Д.А. Пантелеев. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2023. – 184 с.

REFERENCES

1. Bokadarov, S.A. Analysis of the causes of industrial accidents related to the release of hazardous chemicals / S.A. Bokadarov, M.A. Gudkov, A.B. Emelyanov, O.S. Bokadarova // Fire safety: problems and prospects. – 2017. – Vol. 1, No. 8. – P. 491–498.
2. Galeev, A.D. Dynamics of the formation of an explosive cloud during the emergency release of a mixture of liquefied petroleum gases into the atmosphere / A.D. Galeev, E.V. Starovoytova, S.I. Ponikarov // Herald of Kazan Technological University. – 2011. – No. 3. – P. 130–135.

3. Starovoytova, E.V. Modeling and assessment of the consequences of an emergency release of liquefied ammonia / E.V. Starovoytova, A.D. Galeev, S.I. Ponikarov // Herald of Kazan Technological University. – 2011. – No. 13. – P. 175–179.

4. Bazarsky, O.V. Model of evaporation of kerosene droplets in the atmosphere and pollution of soil around the airfield / O.V. Bazarsky, Zh.Yu. Kochetova // Vestnik of MSTU. Scientific journal of Murmansk State Technical University. – 2019. – Vol. 22, No. 1. – P. 64–71.

5. Kotchetova, Z.Y. Rapid assessment of soil pollution with kerosene using a carbon-nanotube-based / Z.Y. Kotchetova, O.V. Bazarsky, T.A. Kuchmenko // Moscow University Chemistry Bulletin. – 2017. – Vol. 72, № 1. – P. 63–68.

6. Application of ALOHA software in fire risk assessments / Joel N. Salazar, Aryatna C. Chibas, Anton V. Krasnov [et al.] // Online edition «Oil and Gas Business». – 2019. – № 4. – P. 56–70.

7. RIA Voronezh website. The accident at the Voronezh ammonia pipeline. Why did the emergency happen and how to avoid its recurrence? – 30.07.2015. – URL: <https://riavrn.ru/news/avariya-na-voronezhskom-ammiakoprovode-pochemu-proizoshlo-chp-i-kak-izbezhat-ego-povtoreniya/> (accessed 01.04.2024).

8. Methodological recommendations No. 24. Medical aspects of the elimination of accidents caused by certain chemically dangerous substances. – Moscow : N.V. Sklifosovsky Research Institute of Emergency Medicine, 2008. – 24 p.

9. Kochetova, Zh.Yu. Ecology of soils of military polygons / Zh.Yu. Kochetova, O.V. Bazarsky, D.A. Panteleeva. – Voronezh : Publishing and printing Center «Scientific book», 2023. – 184 p.

**ЛОКАЛЬНАЯ ДОЗОВАЯ НАГРУЗКА ОТ ПЛОСКОЙ ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ
ЗАЩИТЫ В ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКЕ**LOCAL DOSE LOAD FROM A FLAT SEMI-INFINITE PROTECTION AT AN ARBITRARY
POINT

Панюшкин А.Н., инженер II-й категории
«Научное конструкторско-технологическое
бюро «ФЕРРИТ», Воронеж, Россия

Panyushkin A.N., engineer of the II-th graduate
– category, "Scientific constructional -
technological burro "FERRIT", Voronezh,
Russia

Панюшкин Н.Н., доктор технических наук,
доцент, профессор ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

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

Бирюкова И.П., 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

Biryukova I.P., 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

Аннотация. Представлена модель локальной дозовой нагрузки от электронного и протонного излучения космического пространства в произвольной точке, лежащей за плоской ограниченной защитой. Модель основана на использовании лучевого метода или метода секторирования. В отличие от используемых в настоящее время моделей, которые определяют дозовую нагрузку в точке, лежащей на перпендикуляре к плоскости за защитой, предлагаемая модель позволяет определить дозовую нагрузку в произвольной точке. Такая модель может быть полезна для защит от ионизирующего излучения, имеющих неоднородность массовой толщины, например, при использовании дополнительной защиты чувствительных электрорадиоизделий или учета эффекта тени от других конструкций космического аппарата или других подобных этим случаям. Проведен численный эксперимент для орбиты с удаленностью около 400 километров от поверхности Земли.

Ключевые слова: доза, ионизирующее излучение, лучевой метод, метод секторирования, математическая модель, плоская ограниченная защита, дополнительная защита, массовая толщина барьера, космический аппарат.

Abstract. A model of the local dose load from the electron and proton radiation of outer space at an arbitrary point lying behind a flat limited protection has presented. The model is based on the use of the ray method or the sectorization method. Unlike the currently used models, which determine the dose load at a point lying perpendicular to the plane behind the protection, the proposed model allows you to determine the dose load at any point. Such a model can be useful for protection against ionizing radiation having a heterogeneity of mass thickness, for example, when using additional protection for sensitive electrical devices or taking into account the shadow effect from other

spacecraft structures or other similar cases. A numerical experiment has conducted for an orbit with a distance of about 400 kilometers from the Earth's surface.

Keywords: dose, ionizing radiation, radiation method, sectoring method, mathematical model, flat limited protection, additional protection, mass barrier thickness, spacecraft.

Введение

Точное определение дозовой нагрузки электрорадиоизделий (ЭРИ) бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА) имеет большое практическое значение по причине того, что к такой аппаратуре предъявляются жесткие требования по массе и потребляемой мощности. Низкая потребляемая мощность современных элементов и, в первую очередь, интегральных схем (ИС) является причиной сравнительно низких показателей радиационной стойкости РЭА. Оценка радиационной стойкости ЭРИ проводится по коэффициенту запаса-отношению накопленной дозы к показателю радиационной стойкости. Величина коэффициента запаса должна указываться в техническом задании на разработку или быть не менее 3 [1]. Для выполнения требований по радиационной стойкости применяют различные защитные экраны, роль которых выполняют кожухи РЭА, имеющие, как правило, форму прямоугольных параллелепипедов. Известные программы расчета накопленной дозы (например, [2, 3]) используют приближение сплошной сферы, дающей консервативную оценку локальной дозовой нагрузки (ЛДН) [4]. Однако основным недостатком сферической модели, по мнению авторов, является невозможность определения оптимальной конструкции защиты с точки зрения ЛДН, массы защиты и полезного объема. Такая ситуация возникает, в частности, при использовании защит с неомогенным по массовой толщине барьером. Неомогенность может быть связана и с эффектом «тени» от соседних блоков РЭА и конструкций КА, и с использованием дополнительной защиты в виде дополнительного увеличения толщины стенки барьера в месте расположения чувствительных к дозовым эффектам ЭРИ [2, 3]. Так как приближение сплошной сферы даёт ЛДН в точке, расположенной на перпендикуляре, восстановленном в центре дополнительной защиты или пятна «тени», то использование модели сферы не позволяет оценить ЛДН для всего кожуха в целом (в его центре). Для решения этой задачи и предлагается разработанная модель.

Модель

Расчет ЛДН рекомендовано проводить методом секторирования или лучевым методом [1]. Расчетная точка выбирается на перпендикуляре к поверхности барьера защиты, восстановленном в его центре (точка О на рис. 1). Если массовая толщина барьера по каким-то причинам неоднородна по площади его поверхности, то считать ЛДН приходится по фрагментам с одинаковой массовой толщиной барьера, а результаты складывать. В этом случае для периферийных фрагментов расчетная точка будет смещена от положения на перпендикуляре, восстановленном к центру фрагмента (точка О' на рис. 1). Возникает задача разработки модели для расчёта ЛДН от плоской ограниченной защиты в произвольной точке защищаемого объема.

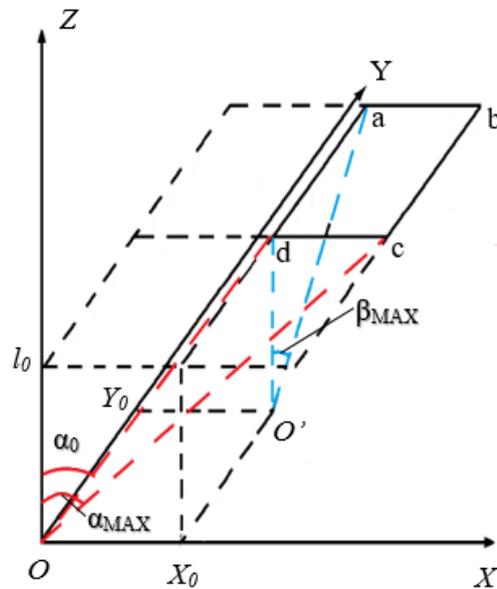


Рисунок 1 – Геометрия фрагмента плоской ограниченной защиты

Значение ЛДН от каждого фрагмента в точке можно определить по формуле [4]:

$$D = \frac{\Omega}{4\pi} \sum_{i=1}^2 (a_i e^{b_i \delta k_{EFF}} + c_i), \quad (1)$$

где Ω – телесный угол фрагмента защиты; a_i , b_i , c_i – коэффициенты аппроксимации для электронного и протонного излучений космического пространства в приближении сплошной сферы (примерно 400 км от поверхности Земли); $\delta = \rho \cdot \Delta$ – массовая толщина барьера фрагмента (ρ – плотность материала; Δ – толщина барьера); для электронного излучения $a_e = 7,23 \cdot 10^3$ рад, $b_e = -3,6$ см²/г, $c_e = 1,6$ рад; для протонного – $a_p = 76,2$ рад, $b_p = -1,5$ см²/г, $c_p = 46,0$ рад.

Коэффициент k_{EFF} определяет отличие массовой толщины защиты в случае приближения сплошной сферы, для которой частицы излучения падают нормально на кромку барьера, и плоской ограниченной защиты (фрагмента), для которой угол падения может быть отличным от нормального. Величина k_{EFF} для точки O' определяется выражением [4]:

$$k_{EFF}' = \frac{l_0^2}{X \cdot Y} \int_0^{\alpha_{MAX}} \int_0^{\beta_{MAX}} \frac{\sqrt{1 + tg^2 \alpha + tg^2 \beta}}{\cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta} d\alpha d\beta, \quad (2)$$

где l_0 – кратчайшее расстояние от фрагмента до расчетной точки O' ; X , Y – размеры фрагмента вдоль осей OX и OY соответственно (ab и ad на рис. 1); α_{MAX} , β_{MAX} – максимальные значения плоских углов в основании телесного угла фрагмента в направлении осей OX и OY соответственно, определяются по формулам $\alpha_{MAX} = \arctg\left(\frac{X}{l_0}\right)$, $\beta_{MAX} = \arctg\left(\frac{Y}{l_0}\right)$.

Для точки O полученное выражение для k_{EFF} имеет вид

$$k_{EFF} = \frac{k'_{EFF}}{2} \left\{ \frac{1}{\cos \left[\arctg \left(\frac{X_0}{l_0} \right) \right]} + \frac{1}{\cos \left[\arctg \left(\frac{Y_0}{l_0} \right) \right]} \right\}, \quad (3)$$

где X_0, Y_0 – смещение фрагмента относительно расчетной точки O вдоль осей OX и OY соответственно. В выражении (3) учтено, что угол падения частиц на кромку барьера фрагмента при расчёте ЛДН в точке O увеличен относительно оси OX на величину $\arctg \left(\frac{X_0}{l_0} \right)$,

а относительно оси OY – на величину $\arctg \left(\frac{Y_0}{l_0} \right)$.

Исходя из определения, телесный угол элемента фрагмента $d\Omega$ можно найти по формуле (рис. 2)

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{r \cdot d\alpha \cdot r \cdot \cos\alpha \cdot d\beta}{r^2} = \cos\alpha \cdot d\alpha \cdot d\beta.$$

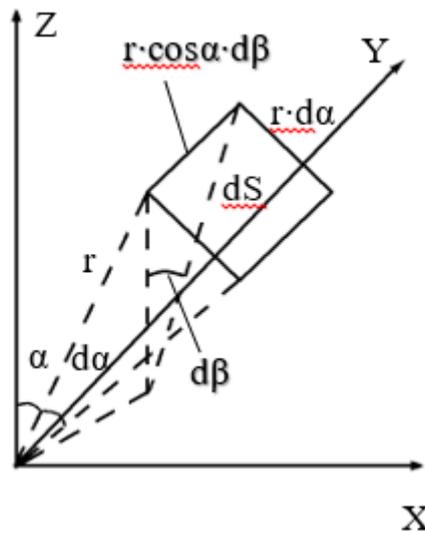


Рисунок 2 – Элемент фрагмента плоской ограниченной защиты

Тогда телесный угол фрагмента будет равен

$$\Omega = \int d\Omega = \int \frac{dS}{r^2} = \int_{\alpha_{MIN}}^{\alpha_{MAX}} \int_{\beta_{MIN}}^{\beta_{MAX}} \cos\alpha d\alpha d\beta = (\sin\alpha_{MAX} - \sin\alpha_{MIN})(\beta_{MAX} - \beta_{MIN}), \quad (4)$$

где величины углов определяются формулами:

$$\alpha_{MIN} = \arctg \left(\frac{\sqrt{X_0^2 + Y_0^2}}{l_0} \right); \quad \alpha_{MAX} = \arctg \left(\frac{\sqrt{(X + X_0)^2 + Y_0^2}}{l_0} \right); \quad (5)$$

$$\beta_{MIN} = 0; \quad \beta_{MAX} = \arctg \left(\frac{Y_0}{l_0} \right).$$

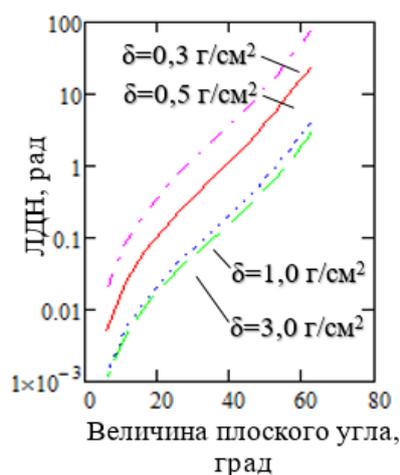


Рисунок 3 – Зависимость локальной дозовой нагрузки от величины плоского угла фрагмента

Разработанная модель состоит из системы уравнений (1) – (5), решение которой позволяет определить ЛДН в произвольной точке за неомогенной защитой.

Результаты моделирования

На рис. 3 приведена зависимость ЛДН, создаваемой фрагментом плоской ограниченной защиты, от половинного значения угла раскрытия α её телесного угла. Видно, что с увеличением α наблюдается практически экспоненциальное возрастание ЛДН (масштаб полулогарифмический). Наблюдаемую закономерность можно объяснить возрастанием числа частиц ионизирующего излучения, проникающего через стягивающую поверхность фрагмента. Увеличение массовой толщины барьера фрагмента приводит к снижению ЛДН. Скорость этого снижения уменьшается с ростом массовой толщины защиты δ , и при величинах δ более 1 г/см^2 практически не наблюдается.

На рис. 4 показана зависимость ЛДН от половинного значения начального угла раскрытия α_0 , определяющего начальное “смещение” в горизонтальной плоскости (XOY) фрагмента от расчетной точки (O), в которой определяется ЛДН. Видно, что при $\alpha \geq \pi/4$ вклад фрагмента в общую ЛДН составляет около 10%, т. е. его можно не учитывать.

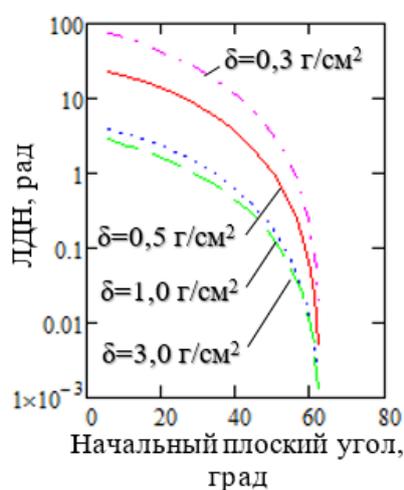


Рисунок 4 – Зависимость локальной дозовой нагрузки от начального плоского угла фрагмента

Заключение

Разработана математическая модель локальной дозовой нагрузки от фрагмента плоской ограниченной защиты в произвольной расчетной точке защищаемого объема. Модель может быть использована для расчета ЛДН, создаваемой плоской ограниченной защитой с неомогенной массовой толщиной барьера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ 134-1034-2012. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценка стойкости бортовой радиоэлектронной космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам. – Москва: Госстандарт, 2012. – 33 с.

2. Пичхадзе, К.М. Расчет локальных поглощённых доз с учетом реальной конфигурации космического аппарата / К.М. Пичхадзе, Н.М. Хамидуллина, И.В. Зефирова // Космические исследования. – 2006. – Т. 44, № 2. – С. 179-182.

3. Комбаев, Т.Ш. Проектирование радиационной защиты приборов космического аппарата при создании универсальных космических платформ / Т.Ш. Комбаев, М.Е. Артемов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2020. – № 4. – С. 30-34.

4. Панюшкин, А.Н. Модель локальной дозовой нагрузки сплошной защиты с плоскими ограничивающими поверхностями / А.Н. Панюшкин, Н.Н. Панюшкин, И.П. Бирюкова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2021. – № 3. – С. 11-16.

REFERENCES

1. OST 134-1034-2012. Hardware, instruments, devices and spacecraft equipment. Test methods and assessment of the resistance of onboard radio-electronic spacecraft to the effects of electron and proton radiation from outer space based on dose effects. – Moscow: Gosstandart, 2012. – 33 p.

2. Pichkhadze, K.M. Calculation of local absorbed doses taking into account the actual configuration of the spacecraft / K.M. Pichkhadze, N.M. Khamidullina, I.V. Zefirova // Space research. – 2006. – Vol. 44, No. 2. – P. 179-182.

3. Kombayev, T.Sh. Design of radiation protection of spacecraft instruments when creating universal space platforms / T.Sh. Kombayev, M.E. Artemov // Questions of atomic science and technology. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment. – 2020. – No. 4. – P. 30-34.

4. Panyushkin, A.N. Model of local dose load of continuous protection with flat bounding surfaces / A.N. Panyushkin, N.N. Panyushkin, I.P. Biryukova // Questions of atomic science and technology. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment. – 2021. – No. 3. – P. 11-16.

**ОБ ОДНОМ РАСПРОСТРАНЁННОМ ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТИ
РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ**

**ABOUT ONE COMMON APPROACH TO ASSESSING THE PROBABILITY OF RADAR
TARGET DETECTION**

Колычев С.А., кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Kolychev S.A., PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher, Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russia

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. 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

Аннотация. В докладе приводятся обоснованные сомнения в том, что общепринятая модель (Рэлеевское распределение амплитуд эхосигнала цели) отражает особенности радиолокационных характеристик реальных целей, поскольку законы распределения их плотности вероятности величин эффективных площадей рассеяния специфичны и, в общем случае, индивидуальны для каждого типа цели и сектора углов визирования. В результате приведенных рассуждений становится очевидным, что искомые распределения вероятности должны определяться с помощью статистических моделей на основе экспериментально снятых диаграмм эхосигналов объектов и радиационного фона.

Ключевые слова: радиолокация, эффективные площади рассеяния, моделирование вероятности обнаружения объектов, распределение Релея, эхосигналы, отражательная способность объектов.

Abstract. The report raises reasonable doubts that the generally accepted model (Rayleigh distribution of target echo signal amplitudes) reflects the features of the radar characteristics of real targets, since the distribution laws of their probability density of effective scattering areas are specific and, in general, individual for each type of target and sector of angles sightings. As a result of the above reasoning, it becomes obvious that the desired probability distributions must be determined using statistical models based on experimentally recorded diagrams of echo signals of objects and the radiation background.

Keywords: radar, effective scattering areas, modeling the probability of detecting objects, Rayleigh distribution, echo signals, reflectivity of objects.

Обычно к радиолокации относят область науки и техники, объединяющую методы и средства локации (обнаружения и измерения координат) и определения свойств различных

объектов (целей) с помощью радиоволн [1]. Для решения таких задач используются радиолокационные устройства (измерители дальности, угловых координат, устройство селекции движущихся целей), которые в случае выполнения какой-нибудь стратегической задачи (обнаружения летательного объекта, радионавигации и т.п.) формируют радиолокационные системы (РЛС) и технически реализуются в виде совокупности блоков или узлов [1], для защиты которых от мощных высокочастотных сигналов применяются противолокационные технологии защиты [2].

При описании отражательной способности объектов в радиолокационном диапазоне длин волн наиболее широко используется его эффективная площадь рассеяния (ЭПР):

$$\sigma(\lambda; \vec{n}_t, \vec{n}_r) = \lim_{r_r \rightarrow \infty} 4\pi r_r^2 \frac{|E_r(r_r)|^2}{|E_t|^2}, \quad (1)$$

где E_t – напряжённость электрического поля плоской волны зондирующего сигнала; $E_r(r)$ – амплитуда эхосигнала объекта в месте его регистрации на расстоянии r_r от него. Кроме свойств объекта величина σ зависит от длины волны зондирующего излучения λ , ракурса зондирования \vec{n}_t и направления распространения эхосигнала \vec{n}_r . При смене ракурса зондирования (а также λ и \vec{n}_r) ЭПР объектов типовой формы подвержена резким глубоким перепадам (замираниям).

Для учёта влияния на вероятность радиолокационного обнаружения объекта таких замираний принято использовать четыре модели плотности вероятности распределения значений ЭПР в угловых секторах возможных ракурсов облучения, предложенные в работе [3]. В работе [4] эти модели отнесены к частным случаям модели, в основе которой лежит представление о том, что в общем случае объект в любом секторе углов зондирования имеет один доминирующий центр формирования эхосигнала и множество локальных статистически независимых центров рассеяния с примерно равными по интенсивности парциальными вкладами в эхосигнал объекта. Вместе с тем нет сомнений в том, что законы распределения значений ЭПР свои для каждой цели и должны определяться по экспериментально снятым диаграммам вторичного излучения [3-5], а рассматриваемая модель используется для того, чтобы обойти сложности получения и истолкования результатов эксперимента. Тем не менее, и в случае радиолокационного наблюдения при обзоре земной поверхности постулируется именно эта модель [6].

До последнего времени основным показателем эффективности технологии противорадиолокационной защиты (качества работы РЛС наблюдения) использовалась вероятность обнаружения объекта защиты (цели). Из всех указанных выше моделей при её оценке используется, как правило, частный случай, соответствующий отсутствию в секторе углов зондирования доминирующего центра рассеяния. Именно для этого и только для этого частного случая справедливо простое и широко используемое на практике математическое соотношение для расчёта этого показателя

$$P_{об} = P_{лт}^{\frac{1}{1+q^2/2}}, \quad (2)$$

где $P_{лм}$ – вероятность ложной тревоги; q – отношение сигнал/шум (корень квадратный из отношения удвоенной энергии информативного эхосигнала, определяемой средним значением эффективной площади рассеяния объекта по возможным ракурсам его визирования к спектральной плотности помехи на входе решающей схемы приёмника, моделируемое Рэлеевским распределением амплитуд эхосигнала цели) [4]. Создаётся впечатление, что именно простота этого выражения является основной причиной выбора основного показателя эффективности самой технологии противорадиолокационной защиты (качества работы РЛС).

Изначально при выводе соотношения (2) предполагалось, что обнаружение эхосигнала цели идёт в собственных шумах приёмника, а пороговое значение решающей схемы установлено так, что эти шумы сами по себе вызывают её срабатывание с вероятностью ложной тревоги $P_{лм}$ [3]. Попытки обобщить это простое соотношение на другие типовые случаи радиолокационного наблюдения в рассматриваемом подходе сводятся к следующему.



Рисунок 1 – Типичное радиолокационное изображение местности в условиях постановки радиопомех

Наиболее «простая» по составу эффективная противорадиолокационная технология включает в качестве базисных технологию снижения радиолокационной заметности (РЛЗ) цели и технологию постановки заградительной (шумовой) помехи. При обобщении выражения (2) на этот случай спектральная плотность внешней заградительной помехи аддитивно добавляется к спектральной плотности собственных шумов приёмника, что само по себе не может вызывать каких-либо возражений. Но такая добавка предполагает другой механизм установки порога решающей схемы и другую трактовку $P_{лм}$, поскольку означает, что при появлении заградительной помехи этот порог автоматически изменяется так, чтобы фигурирующее в нём как исходное данное значение $P_{лм}$ осталось тем же, т.е. как и при обнаружении информативного эхосигнала в собственных шумах приёмника РЛС. Как следствие вероятность превышения «задранного вверх» порога при приёме информативного сигнала снижается, а вероятность его пропуска возрастает. Визуально это соответствует чистому экрану радиолокатора с изредка мерцающей на нём отметкой цели (низкое $P_{лм}$). Это

контрастирует с известным представлением о том, что при постановке заградительной помехи экран локатора засвечен (см. рис. 1).

При обобщении соотношения (2) на случай обнаружения наземных объектов к сумме спектральных плотностей собственных шумов и заградительной помехи добавляется энергия эхосигнала фона. В силу разной физической природы воздействия на приёмник местных фоновых отражений и шумовых помех уже сама эта добавка никак не обоснована. Такая добавка в зависимости от соотношений разрешаемого РЛС объёма и размеров цели приводит при использовании соотношения (2) к странным, мягко говоря, результатам. Например, в случае, когда разрешаемый объём РЛС захватывает часть цели и при этом вовсе не захватывает «фонирующие» участки местности, такая добавка совершенно не уместна, а в случае, когда размер цели существенно меньше разрешаемого объёма, эта добавка может оказаться решающей в оценке вероятности обнаружения, особенно при когерентном накоплении эхосигналов при обработке. В последнем случае вероятность правильного обнаружения цели 0,95 (типовые требования к РЛС при обнаружении в собственных шумах) при ложной тревоге 10^{-3} достигается по (2) при контрасте, равном 137 (при уровне ложной тревоги 10^{-6} – при контрасте 275). Это «чудовищное» занижение возможностей РЛС. Кроме того, такой подход не позволяет оценивать вероятность обнаружения цели при её отрицательном контрасте на фоне местных отражений (обнаружение радиотени объекта).

Принципиальная возможность обнаружения в том или ином месте объекта вообще и наземного объекта в особенности базируется на различии двух эхосигналов: от места наблюдения в отсутствие объекта в нём и от этого же места при расположении в нём искомого объекта. При работе в режиме обзора принципиально возможно подобрать пороговое значение решающей схемы приёмника РЛС так, чтобы с вероятностью, не превышающей заданный уровень ложных тревог в собственных шумах приёмника, пропускались эхосигналы фона местных отражений. Тогда вероятность превышения этого порога при условии наличия в данном месте искомого объекта (т.е. суммарным эхосигналом объекта и фона от незатенённого объектом участка местности в разрешаемом объёме РЛС) является естественной оценкой вероятности его обнаружения. Такой подход допускает обобщение на случай отрицательного контраста цели на подстилающей поверхности (обнаружение по радиотени), но требует отказа от простого соотношения (2) и несколько более сложной вычислительной процедуры.

В плане формирования эхосигнала рассматриваемая статистическая модель аналогична модели формирования радиошумов, источники которых сопоставимы по интенсивности, а начальные фазы их сигналов независимы и равновероятны на ансамбле реализаций в интервале $0 \dots 2\pi$. При достаточно большом числе таких источников в соответствии с предельной теоремой амплитудное распределение будет описываться законом Рэлея (или обобщённым законом Рэлея при наличии доминирующего центров рассеяния). По этой аналогии реализации ансамбля случайного процесса регистрации эхосигнала в зависимости от ракурса характеризуются независимым равновероятным распределением начальных фаз эхосигналов отдельных центров рассеяния исследуемого объекта. На самом деле вклады в эхосигнал этих центров рассеяния обусловлены, кроме самого ракурса зондирования и характеристик зондирующего сигнала, конструкцией объекта, так что начальные фазы этих

вкладов не независимы, а между эхосигналами объекта при различных ракурсах облучения существует не случайная взаимосвязь.

Кроме того, амплитуда эхосигнала от реального объекта в любом угловом секторе ракурсов наблюдения имеет конкретное максимальное значение, плотность распределения вероятности его амплитуд большей величины равна нулю. Как правило, существует и конкретное минимальное значение амплитуды эхосигнала реального объекта, отличное от нуля, плотность вероятности значений амплитуды эхосигнала ниже которого также обращается в ноль. Диаграммы обратного рассеяния реальных объектов характеризуются наличием довольно большого числа выраженных интерференционных выбросов (рис. 1). Вблизи максимумов этих выбросов зависимость ЭПР от угла зондирования замедляется. Следствием этого является то, что плотность вероятности значений ЭПР при приближении к значениям её локальных максимумов возрастает, а при переходе через них снижается, приобретая изрезанный (волнообразный) характер. Такое поведение плотности вероятности значений амплитуд эхосигналов реальных целей также не описывается общепринятой моделью (законами Рэлея).

Закон распределения Рэлея имеет всего один параметр. Нельзя ожидать, что одним параметром можно адекватно описать всё разнообразие диаграмм рассеяния реальных целей во всех произвольных угловых секторах. Обобщённый закон Рэлея имеет два параметра, но он предполагает доминирование одного центров рассеяния во всём секторе углов наблюдения, что на практике встречается крайне редко.

Выводы

Законы распределения плотности вероятности значений ЭПР реальных целей специфичны, в общем случае свои для каждого типа цели и каждого сектора углов визирования, а их различия не описываются только разницей их средних (среднеквадратичных) значений.

Общепринятая модель (законы распределения Рэлея) не отражает особенностей радиолокационных характеристик реальных целей и, следовательно, не может использоваться для оценки их радиолокационной заметности в том смысле, что полученные численные значения соответствующих показателей не могут считаться относящимися именно к этим целям.

Использование соотношения (2) для оценки вероятности обнаружения цели не обосновано в силу несоответствия физической модели, лежащей в основе вывода этого соотношения, физике формирования эхосигнала реальными объектами (особенно при обобщении этого выражения на случай радиолокационного наблюдения наземных целей).

На сегодняшний день основным источником достоверной информации о распределении плотности вероятности значений ЭПР реальных целей при случайных ракурсах наблюдения являются соответствующие экспериментальные исследования.

Поскольку для определения средних величин необходимы достаточно полные выборки значений ЭПР объекта в тех или иных угловых секторах визирования, нет каких-либо непреодолимых трудностей при отказе от общепринятых (Рэлеевских) моделей и переходе к статистическим моделям на основе соответствующих экспериментальных данных (или адекватных теоретических оценок). При этом можно получать не только «среднюю» по

сектору углов визирования вероятность обнаружения, но и значения вероятности обнаружения, не превышающие (или превышающие) в определённом заданном проценте случаев наблюдения объекта под соответствующими ракурсами.

Подобный подход к определению качества работы систем связи и задания требований к ним практиковался международным консультативным комитетом по радио. Можно, таким образом, говорить о самостоятельном актуальном направлении научных исследований на радиолокационных измерительных комплексах по определению распределений плотности вероятности значений ЭПР образцов техники (в том числе в защищённых средствах снижения заметности исполнениях).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гофуров, Ё.К. Классификация, принцип действия и основные методы радиолокации / Ё.К. Гофуров // *Oriental Renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*. – 2023. – 3(1/2), Jan. – С. 386-396.
2. Борейко, Д.А. Улучшение параметров противолокационных фильтров / Д.А. Борейко // *Омский научный вестник*. – 2013. – № 2(120). – С. 305-308.
3. Swerling, P. Probability of Detection for Fluctuating Targets / P. Swerling // *IRE Trans, on Information Theory*. – Vol. IT-6, April 1960. – P. 269-308.
4. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. – Москва: Советское радио, 1970. – 560 с.
5. Штагер, Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы / Е.А. Штагер. – Москва: Радио и связь, 1986. – 182 с.
6. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук; под ред. В.С. Вербы. – Мосува: Радиотехника, 2010. – 680 с.

REFERENCES

1. Gofurov, E.K. Classification, operating principle and basic methods of radar / E.K. Gofurov // *Oriental Renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*. – 2023. – 3 (1/2), Jan. – P. 386-396.
2. Boreiko, D.A. Improving the parameters of anti-radar filters / D.A. Boreiko // *Omsk Scientific Bulletin*. – 2013. – No. 2 (120). – P. 305-308.
3. Swerling, P. Probability of Detection for Fluctuating Targets / P. Swerling // *IRE Trans, on Information Theory*. – Vol. IT-6, April 1960. – P. 269-308.
4. Theoretical foundations of radar / Ed. Ya.D. Shirman. – Moscow: Sovetskoe Radio, 1970. – 560 p.
5. Shtager, E.A. Scattering of Radio Waves on Complex-Shaped Bodies / E.A. Shtager. – Moscow: Radio and Communications, 1986. – 182 p.
6. Space-Based Radar Systems for Earth Surveillance / V.S. Verba, L.B. Neronsky, I.G. Osipov, V.E. Turuk; edited by V.S. Verba. – Moscow: Radio Engineering, 2010. – 680 p.

Секция 2. ТЕХНОЛОГИИ. НАУКА. МОЛОДЕЖЬ

DOI: 10.58168/PBST_75-83

УДК 539.173

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ КОРРЕЛЯЦИИ СПИНОВ ДВОЙНОГО ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

ESTIMATION OF SPINS CORRELATION COEFFICIENTS IN BINARY NUCLEAR FISSION

Писклюков А.А., аспирант, инженер
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет», Воронеж, Россия

Любашевский Д.Е., доктор физико-
математических наук, доцент, доцент
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет», Воронеж, Россия

Кострюков П.В., аспирант, преподаватель
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова» / ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный университет», Воронеж,
Россия

Pisklyukov A.A., postgraduate student,
engineer, Voronezh State University, Voronezh,
Russia

Lyubashevsky D.E., DrSc in Physics and
Mathematics, Docent, Associate professor,
Voronezh State University, Voronezh, Russia

Kostryukov P.V., PhD student, teacher,
Voronezh State University of Forestry and
Technologies named after G.F. Morozov /
Voronezh State University, Voronezh, Russia

Аннотация. В рамках модели холодного делящегося ядра был проведен расчет коэффициентов корреляции спинов фрагментов спонтанного и низкоэнергетического деления ядер. Было показано, что коэффициент корреляции хорошо согласуется с результатами как экспериментальных, так и теоретических работ. Полученные результаты вступают в некоторое противоречие с законом сохранения полного спина, сохраняющегося в рассматриваемых видах деления. Поэтому вызванная проблема требует дальнейшего анализа.

Ключевые слова: деление ядер, спиновое распределение, коэффициенты корреляции.

Abstract. In the framework of the cold fissile nucleus model, the correlation coefficients of the spins of fragments of spontaneous and low-energy nuclear fission have been calculated. It has been shown that the correlation coefficient is in good agreement with the results of both experimental and theoretical works. The obtained results are in some controversy with the total spin conservation law, which is hold in the considered types of fission. Thus, the raised problem requires further analysis.

Keywords: nuclear fission, spin distribution, correlation coefficients.

Введение

Квантовая теория деления строго определяет связь между спиновыми распределениями первичных фрагментов деления и характеристиками, отвечающими за динамику процесса, такими как множественности, энергетические и угловые распределения испарительных и запаздывающих нейтронов или γ -квантов. Однако до сих пор неясен механизм формирования распределений спинов. Так, согласно имеющимся экспериментальным данным, значения

спинов обоих фрагментов J_1 и J_2 значительно превышают спин делящегося ядра J . Это вытекает из предположения, что векторы спинов J_1 и J_2 ориентированы перпендикулярно оси симметрии делящегося ядра в момент его деления. При этом причина накачки спинов тоже остается загадкой.

Попытки объяснить это явление с помощью кулоновского взаимодействия деформированных фрагментов деления оказались неудовлетворительными. Современное понимание этого процесса основано на использовании [1] коллективных поперечных колебательных мод делящегося ядра около точки деления. Выделяют шесть нормальных колебаний, среди которых tilting- и twisting-колебания, а также поперечные wriggling- и bending-колебания, которые вносят основной вклад в значения спинов первичных фрагментов деления J_1 и J_2 . Поперечные моды имеют малые времена релаксации, поэтому их возбуждение более вероятно.

В сравнительно недавней работе Wilson et al. [2], где были приведены обширные экспериментальные данные для спонтанного деления, полученные на установке ALTO лаборатории ИС в Орсе (Франция), изучался вопрос генерации углового момента при делении ядер, которые являются компонентами спинов J_1 и J_2 . В частности, на основе анализа данных, авторы пришли к выводу, что между угловыми моментами двух фрагментов деления нет существенной корреляции, то есть появление спинов у обоих фрагментов происходит независимым образом. Другими словами, изменение спина первого фрагмента не оказывает никакого влияния на спин второго фрагмента и наоборот, хотя некоррелированность спинов должна противоречить закону сохранения полного спина. Поэтому проведение оценки коэффициентов корреляции спинов фрагментов двойного деления в модели «холодного» ядра представляет большой интерес. Этот подход подразумевает, что вплоть до точки разрыва ядра на два фрагмента деления в ядре не возбуждаются сложные многоквaziчастичные состояния, причем вся энергия переходит в неравновесную деформацию каждого из предфрагментов, а процесс термализации фрагментов происходит путем перехода указанных фрагментов в равновесные по своим деформациям состояния.

Поэтому цель данной работы – оценка коэффициентов корреляции спинов двойного деления ядер в рамках теории холодности делящегося ядра.

Коэффициент корреляции

Понимание процесса накачки больших значений спинов [3-6] основано на использовании двух типов поперечных, дважды вырожденных по оси X и Y bending- и wriggling-колебаний составного делящегося ядра в окрестности точки его разрыва, рассмотренных впервые в [7].

В процессе bending-колебаний один из неравновесно-деформированных, но «холодных» предфрагментов деления поворачивается по или против часовой стрелки вокруг некоторой оси, перпендикулярной оси симметрии делящегося ядра Z , а второй, соответственно, в противоположном направлении относительно первого. Оба предфрагмента деления соприкасаются в области шейки и после ее разрыва переходят во фрагменты деления (ФД), которые затем термализуются, уменьшая деформацию до равновесной. Причем, согласно закону сохранения полного спина составного делящегося ядра, появление компонент

спинов J_{b_1} и J_{b_2} , связанных с поперечными bending-колебаниями, должны удовлетворять условию:

$$J_{b_1} = -J_{b_2}. \quad (1)$$

В процессе же wriggling-колебаний неравномерно-деформированные и «холодные» предфрагменты деления поворачиваются по или против часовой стрелки вокруг некоторой оси Z , что приводит к появлению больших по величине и одинаково направленных спинов J_{w_1} и J_{w_2} вылетающих ФД. Согласно закону сохранения полного спина, уравнивание суммарного спина предфрагментов деления

$$F_w = J_{w_1} + J_{w_2} \quad (2)$$

происходит за счет поворота составного ядра вокруг той же оси в противоположную сторону, что приводит к генерации большого значения относительного орбитального момента фрагментов L_w , который в силу рассмотренного выше закона сохранения должен удовлетворять равенству:

$$L_w = -F_w. \quad (3)$$

Как видно из представленных выше рассуждений оба вида поперечных колебаний дают вклад в спиновые распределения фрагментов деления, но только wriggling-колебания фактически определяют распределение относительных орбитальных моментов L этих фрагментов. Поскольку значения спина J делящегося ядра заметно меньше среднего значения \bar{L} , то значительная часть спина J приводит к накачке относительного орбитального момента L , а не спинов J_1 и J_2 . Для описания накачки больших значений спинов и спиновых распределений ФД спонтанного и низкоэнергетического вынужденного деления ядер в работе [3] основополагающая роль отводилась поперечным bending-колебаниям, что отлично от излагаемого в данной работе подхода, предполагающего преобладающий вклад wriggling-колебания, противоречащий выводам работы [8]. Также подходы работ [3, 8] для описания спинового распределения ФД базируются на концепции значительной термализации ФД, обладающих температурой T , превышающей 1 МэВ в окрестности точки разрыва делящегося ядра. Это существенно отличается от излагаемого в данной работе подхода, поскольку ФД остаются «холодными» вплоть до точки разрыва, чем и вызвана необходимость учета только нулевых поперечных bending- и wriggling-колебаний. Величина энергии нулевых bending-колебаний значительно меньше аналогичной величины для случая wriggling-колебаний, поэтому в рамках температурного подхода ведущий вклад в спиновое распределение будут вносить bending-колебания. Реализация температурного подхода работ [3, 8] приводила бы к статистическому смешиванию всех проекций K . Следовательно, оно перестало бы быть «хорошим» квантовым числом, приводящим к исчезновению анизотропий направлений вылета ФД. Поскольку изотропность распределения не наблюдается экспериментально, то можно с уверенностью говорить о «холодности» делящегося ядра вблизи его точки разрыва на ФД и о формировании спиновых распределений ФД под влиянием нулевых wriggling- и bending-колебаний делящегося ядра.

Рассмотрим корреляцию между спинами ФД двойного спонтанного и вынужденного низкоэнергетического деления ядер. В ее основе лежит распределение, описывающее зависимость значений спинов J_1 и J_2 и угла $\phi \in [0; \pi]$ между ними. При построении

распределений вероятностей $P(J_1, J_2, \phi)$ для wriggling- и bending-колебаний использовались только нулевые осцилляторные волновые функции в импульсном представлении, которые приводят к следующей форме:

$$P(J_1, J_2, \phi) = \frac{2J_1J_2}{\pi C_b C_w} \exp \left\{ -J_1^2 \alpha_2 - J_2^2 \alpha_1 + 2J_1J_2 \cos \phi \left[\frac{I_1 I_2}{C_b (I_1 + I_2)^2} - C_w^{-1} \right] \right\}. \quad (4)$$

Коэффициенты $\alpha_i = \frac{I_i^2}{C_b (I_1 + I_2)^2} + \frac{1}{C_b}$ и $C_k = I_k \hbar \omega_k$ связываются с указанными колебаниями системы, где $\hbar \omega_k$ – энергии bending- и wriggling-колебаний соответственно, которые вычисляются отдельно. Их моменты инерции I_b и I_w имеют следующий вид:

$$I_b = I_1 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 I_2, I_w = \frac{(I_1 + I_2) I_0}{I}, \quad (5)$$

где I_1 и I_2 – моменты инерции первого и второго фрагментов; I и I_0 – суммарный и нулевой моменты инерции; R_1 и R_2 – радиусы первого и второго фрагментов.

Как известно, для описания системы двух случайных величин помимо математического ожидания и дисперсии используются также корреляционный момент и коэффициент корреляции. В рамках настоящего подхода корреляционный момент $\mu_{J_1 J_2}$ случайных величин спинов J_1 и J_2 представляет собой математическое ожидание произведения отклонений этих величин:

$$\mu_{J_1 J_2} = \iint_0^\infty (J_1 - M(J_1))(J_2 - M(J_2)) P(J_1, J_2) dJ_1 dJ_2, \quad (6)$$

где $P(J_1, J_2)$ – функция плотности вероятности распределения вероятностей спинов двух независимых колебаний, получаемая после интегрирования функции $P(J_1, J_2, \phi)$ по углу ϕ .

В таком случае коэффициент корреляции $c_{J_1 J_2}(A_1, A_2)$ случайных величин спинов J_1 и J_2 представляет собой отношение корреляционного момента к произведению среднеквадратических отклонений $\sigma_{J_1} \sigma_{J_2}$ этих величин:

$$c_{J_1 J_2}(A_1, A_1) = \frac{\mu_{J_1 J_2}}{\sigma_{J_1} \sigma_{J_2}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{J_1} = \sqrt{M(J_1^2) - (M(J_1))^2}$ и $\sigma_{J_2} = \sqrt{M(J_2^2) - (M(J_2))^2}$.

Коэффициент $c_{J_1 J_2}(A_1, A_2)$ для каждой пары массовых чисел A_1, A_2 , рассчитывается индивидуально. Однако, для нашей задачи больше подходит интегральный показатель, который можно назвать обобщенным коэффициентом, имеющий вид

$$c_{J_1 J_2} = \frac{\sum c_{J_1 J_2}(A_1, A_2) \cdot Y(A_1, A_2)}{\sum Y(A_1, A_2)}, \quad (8)$$

где $Y(A_1, A_2)$ – выход первичных фрагментов с массовыми числами A_1 и A_2 , которые хорошо известны для исследуемых реакций. Ниже в таблице 1 представлены вычисленные коэффициенты $c_{J_1 J_2}$ корреляции для низкоэнергетического вынужденного и спонтанного деления ядер-актининов.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции $c_{J_1 J_2}$ для $^{238}\text{U}(n, f)$, $^{232}\text{Th}(n, f)$ и $^{252}\text{Cf}(sf)$.

	$^{238}\text{U}(n, f)$	$^{232}\text{Th}(n, f)$	$^{252}\text{Cf}(s, f)$
$c_{J_1 J_2}$	0.02	0.034	0.017

Продемонстрированные в табл. 1 величины хорошо сходятся с экспериментальными данными и моделированием работы Wilson et al [2]. Так, моделирование в [2] показало, что есть две области корреляции, где величины типа $c_{J_1 J_2}(A_1, A_2)$ находятся в районе 0.4, то есть, где взаимосвязь между спинами J_1 и J_2 слаба, либо вообще отсутствует, в этом случае значение составляет -0.1 . Обработанные данные указывают на второй вариант. Однако стоит отметить, что используемые представления о формировании больших значений спинов фрагментов деления отличны от [2].

Альтернативный метод

Используя модель деления FREYA [8], группа Дж. Рендрапа, исходя из корреляционного анализа поперечных bending- и wriggling-колебании, также хотела показать, что спины ФД независимы друг от друга, и, следовательно, их можно наделить большими значениями. В своем подходе в точке разрыва на ФД они используют реалистичные моменты инерции, которые определяются в «at hot» аппроксимации [9]. Физический смысл этого метода сводится к следующему: в районе магических ядер момент инерции принимается равным 0.2 от твердотельного значения, во всей остальной области – 0.5. Как отмечалось авторами работы, при таком выборе моментов инерции расчет естественным образом приводит к пилообразному поведению среднего спина ФД. После чего делается заключение, что легкий ФД может нести больший спин, чем тяжелый фрагмент.

Модель FREYA [9, 10] использует метод Монте-Карло для выбора массы, заряда и скорости первичных фрагментов, а также для их последующей термализации путем последовательного испарения нейтронов и гамма-квантов, тем самым генерируя большие выборки полных событий деления. Детальное исследование влияния нуклонного обмена на динамическую эволюцию спинов ФД учитывало возбуждение шести описанных выше вращательных мод [11, 12]. В частности, в работе [9] были получены выражения для соответствующих коэффициентов подвижности, определяющих временные масштабы. Откуда следовало важное заключение о том, что, если время релаксации для конкретной моды мало по сравнению с коллективной эволюцией, то соответствующее распределение спинов быстро приспособливается к развивающейся геометрии делящейся системы и, таким образом, остается в локальном равновесии.

Используя этот идеализированный предел для всех шести мод, была предложена модель [13] статистического равновесия для спинов фрагментов в реакциях деления и тяжелых ионов. Однако коэффициенты подвижности для вращательных мод существенно различаются по величине, в результате чего время релаксации для wriggling-моды очень мало, тогда как tilting-мода возбуждается довольно медленно. Простейшим способом учета этой сложности в модели FREYA стало введение механизма нуклонного обмена, в котором предполагается

полная релаксация поперечных мод, в то время как продольные моды, то есть twisting и tilting, не возбуждаются [14].

Спины двух фрагментов не являются независимыми из-за сохранения углового момента. Действительно, спиновые вклады двух фрагментов для wriggling-колебаний параллельны друг другу, тогда как вклады для bending-колебаний антипараллельны. При статистическом заселении этих мод результирующий коэффициент корреляции для отдельных спинов фрагментов имеет вид

$$c(S_L, S_H) = \frac{\sigma(S_L, S_H)}{\sigma(S_L)\sigma(S_H)} = \frac{\langle S_L \cdot S_H \rangle - \langle S_L \rangle \langle S_H \rangle}{\sigma(S_L) \sigma(S_H)} = -\sqrt{\frac{I_L I_H}{(I_R + I_L)(I_R + I_H)}}. \quad (9)$$

Эта величина, как правило, весьма мала, поскольку момент инерции относительного движения фрагмента I_R обычно на порядок больше, чем у отдельных фрагментов I_L и I_H .

Таким образом авторы полагают, что результирующие спины будут относительно независимыми, хотя спины фрагментов сильно связаны для каждой из нормальных мод. Данное предположение действительно подтверждается реальным моделированием FREYA [18, 5], как показано в табл. 2. В ней перечислены средние величины спина и обобщенный коэффициент корреляции для четырех наиболее часто рассматриваемых случаев деления. Коэффициенты корреляции практически равны нулю, это указывает на то, что величины первичных спинов в значительной степени некоррелированы, в соответствии с экспериментальными данными [2].

Таблица 2. Средние величины спинов первичных осколков деления $\langle S_L \rangle$ и $\langle S_H \rangle$ и соответствующие обобщенные коэффициенты корреляции $c(S_L, S_H)$ для $^{235}\text{U}(n, f)$, $^{238}\text{U}(n, f)$, $^{239}\text{Pu}(n, f)$ и $^{252}\text{Cf}(s, f)$, рассчитанные в рамках работы [8]

	$^{235}\text{U}(n, f)$	$^{238}\text{U}(n, f)$	$^{239}\text{Pu}(n, f)$	$^{252}\text{Cf}(s, f)$
$\langle S_L \rangle$	4.27	4.43	4.58	5.08
$\langle S_H \rangle$	5.66	5.80	5.93	6.33
$c(S_L, S_H)$	0.002	0.002	0.001	0.001

Заключение

В настоящей работе была проведена оценка коэффициентов корреляции спинов двойного деления ядер. Значения коэффициентов корреляции между фрагментами в этой работе оказались малы, указывающие на то, что величины первичных спинов ФД являются некоррелированными. Это находится в разумном согласии как с экспериментальными данными работы [2], так и с полученным результатом теоретической работы [8].

При этом методика расчета коэффициента корреляции в рамках данной работы отличалась от упомянутой выше. Использование представления холодности ядра, в котором ядро не претерпевает нагрева на всем пути его деления, позволяет отбросить зависимость от энергии возбуждения составной делящейся системы. В то время как в предложенном в работах [8, 15] методе фрагменты деления имеют разную деформацию, а значит и разные температуры. Это приводит к мысли, что после термализации при переходе к равновесным состояниям

использование усредненной температуры вызывают большие сомнения, в отличие от применяемых в данной работе представлений.

Однако полученный результат вызывает явное противоречие с имеющимися представлениями концепции холодного деления, где закон сохранения спина выполняется. Следовательно, используемый метод имеет общий вместе со сравниваемыми работами недостаток. Вероятно, это связано с тем, что нет линейной зависимости между спинами. В пользу этого свидетельствует сложная форма спинового распределения $P(J_1, J_2, \phi)$. Предполагается, что другие виды статистического анализа позволят выявить искомую связь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nix, J.R. Studies in the liquid-drop theory of nuclear fission / J.R. Nix, W.J. Swiatecki // Nuclear Physics. – 1965. – Vol. 71, Iss. 1. – P. 1-94. – [https://doi.org/10.1016/0029-5582\(65\)90038-6](https://doi.org/10.1016/0029-5582(65)90038-6).
2. Angular momentum generation in nuclear fission / J.N. Wilson, D. Thisse, M. Lebois [et. al.] // Nature. – 2021. – Vol. 590. – P. 566-570. – DOI: 10.1038/s41586-021-03304-w.
3. Rasmussen, J.O. A model for calculating the angular momentum distribution of fission fragments / J.O. Rasmussen, W. Noerenberg, H.J. Mang // Nuclear Physics A. – 1969. – Vol. 136, Iss. 2. – P. 465-480. – DOI: 10.1016/0375-9474(69)90066-9.
4. Angular Momentum of Primary Products Formed in the Spontaneous Fission of ^{252}Cf / J.B. Wilhelmy, E. Cheifetz, R.C. Jared [et. al.] // Physical Review C. – 1972. – Vol. 5, Iss. 6. – P. 2041-2060. – <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.5.2041>.
5. Moretto, L.G. Angular momentum bearing modes in fission / L.G. Moretto, G.F. Peaslee, G.F. Wozniak // Nuclear Physics A. – 1989. – Vol. 502. – P. 453-472. – [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(89\)90682-9](https://doi.org/10.1016/0375-9474(89)90682-9).
6. Role of bending mode in generation of angular momentum of fission fragments / T.M. Shneidman, G.G. Adamian, N.V. Antonenko [et. al.] // Physical Review C. – 2002. – Vol. 65. – Art. No. 064302. – DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.65.064302>.
7. Бунаков, В.Е. Влияние поперечных колебаний делящихся ядер на угловые и спиновые распределения осколков низкоэнергетического деления / В.Е. Бунаков, С.Г. Кадменский, Д.Е. Любашевский // Ядерная физика. – 2016. – Т. 79, № 3. – С. 198-206.
8. Randrup, J. Generation of fragment angular momentum in fission / J. Randrup, R. Vogt // Physical Review Letters. – 2021. – Vol. 127, Iss. 6. – Art. No. 062502. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.062502>.
9. Randrup, J. Calculation of fission observables through event-by-event simulation / J. Randrup, R. Vogt // Physical Review C. – 2009. – Vol. 80, Iss. 2. – Art. No. 024601. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.80.024601>.
10. Verbeke, J.M. Fission reaction event yield algorithm FREYA 2.0.2 / J.M. Verbeke, J. Randrup, R. Vogt // Computer Physics Communications. – 2018. – Vol. 222. – P. 263-266. – <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2017.09.006>.
11. Døssing, T. Dynamical evolution of angular momentum in damped nuclear reactions: (I). Accumulation of angular momentum by nucleon transfer / T. Døssing, J. Randrup // Nuclear Physics A. – 1985. – Vol. 433, Iss. 2. – P. 215-279. – [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(85\)90178-2](https://doi.org/10.1016/0375-9474(85)90178-2).

12. Døssing, T. Dynamical evolution of angular momentum in damped nuclear reactions: (II). Observation of angular momentum through sequential decay / T. Døssing, J. Randrup // Nuclear Physics A. – 1985. – Vol. 433, Iss. 2. – P. 280-350. – [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(85\)90179-4](https://doi.org/10.1016/0375-9474(85)90179-4).
13. Moretto, L.G. Equilibrium statistical treatment of angular momenta associated with collective modes in fission and heavy-ion reactions / L.G. Moretto, R.P. Schmitt // Physical Review C. – 1980. – Vol. 21, Iss. 1. – P. 204-216. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.21.204>.
14. Randrup, J. Refined treatment of angular momentum in the event-by-event fission model freya / J. Randrup, R. Vogt // Physical Review C. – 2014. – Vol. 89, Iss. 4. – Art. No. 044601. – <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.89.044601>.
15. Vogt, R. Angular momentum effects in fission / R. Vogt, J. Randrup // Physical Review C. – 2021. – Vol. 103, Iss. 1. – Art. No. 014610. – <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.103.014610>.

REFERENCES

1. Nix, J.R. Studies in the liquid-drop theory of nuclear fission / J.R. Nix, W.J. Swiatecki // Nuclear Physics. – 1965. – Vol. 71, Iss. 1. – P. 1-94. – [https://doi.org/10.1016/0029-5582\(65\)90038-6](https://doi.org/10.1016/0029-5582(65)90038-6).
2. Angular momentum generation in nuclear fission / J.N. Wilson, D. Thisse, M. Lebois [et. al.] // Nature. – 2021. – Vol. 590. – P. 566-570. – DOI: 10.1038/s41586-021-03304-w.
3. Rasmussen, J.O. A model for calculating the angular momentum distribution of fission fragments / J.O. Rasmussen, W. Noerenberg, H.J. Mang // Nuclear Physics A. – 1969. – Vol. 136, Iss. 2. – P. 465-480. – DOI: 10.1016/0375-9474(69)90066-9.
4. Angular Momentum of Primary Products Formed in the Spontaneous Fission of ^{252}Cf / J.B. Wilhelmy, E. Cheifetz, R.C. Jared [et. al.] // Physical Review C. – 1972. – Vol. 5, Iss. 6. – P. 2041-2060. – <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.5.2041>.
5. Moretto, L.G. Angular momentum bearing modes in fission / L.G. Moretto, G.F. Peaslee, G.F. Wozniak // Nuclear Physics A. – 1989. – Vol. 502. – P. 453-472. – [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(89\)90682-9](https://doi.org/10.1016/0375-9474(89)90682-9).
6. Role of bending mode in generation of angular momentum of fission fragments / T.M. Shneidman, G.G. Adamian, N.V. Antonenko [et. al.] // Physical Review C. – 2002. – Vol. 65. – Art. No. 064302. – DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.65.064302>.
7. Bunakov, V.E. Effect of transverse vibrations of fissile nuclei on the angular and spin distributions of low-energy fission fragments / V.E. Bunakov, S.G. Kadmsky, D.E. Lyubashevsky // Physics of Atomic Nuclei. – 2016. – Vol. 79, No. 3. – P. 304–312.
8. Randrup, J. Generation of fragment angular momentum in fission / J. Randrup, R. Vogt // Physical Review Letters. – 2021. – Vol. 127, Iss. 6. – Art. No. 062502. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.062502>.
9. Randrup, J. Calculation of fission observables through event-by-event simulation / J. Randrup, R. Vogt // Physical Review C. – 2009. – Vol. 80, Iss. 2. – Art. No. 024601. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.80.024601>.
10. Verbeke, J.M. Fission reaction event yield algorithm FREYA 2.0.2 / J.M. Verbeke, J. Randrup, R. Vogt // Computer Physics Communications. – 2018. – Vol. 222. – P. 263-266. – <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2017.09.006>.

11. Døssing, T. Dynamical evolution of angular momentum in damped nuclear reactions: (I). Accumulation of angular momentum by nucleon transfer / T. Døssing, J. Randrup // Nuclear Physics A. – 1985. – Vol. 433, Iss. 2. – P. 215-279. – [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(85\)90178-2](https://doi.org/10.1016/0375-9474(85)90178-2).
12. Døssing, T. Dynamical evolution of angular momentum in damped nuclear reactions: (II). Observation of angular momentum through sequential decay / T. Døssing, J. Randrup // Nuclear Physics A. – 1985. – Vol. 433, Iss. 2. – P. 280-350. – [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(85\)90179-4](https://doi.org/10.1016/0375-9474(85)90179-4).
13. Moretto, L.G. Equilibrium statistical treatment of angular momenta associated with collective modes in fission and heavy-ion reactions / L.G. Moretto, R.P. Schmitt // Physical Review C. – 1980. – Vol. 21, Iss. 1. – P. 204-216. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.21.204>.
14. Randrup, J. Refined treatment of angular momentum in the event-by-event fission model freya / J. Randrup, R. Vogt // Physical Review C. – 2014. – Vol. 89, Iss. 4. – Art. No. 044601. – <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.89.044601>.
15. Vogt, R. Angular momentum effects in fission / R. Vogt, J. Randrup // Physical Review C. – 2021. – Vol. 103, Iss. 1. – Art. No. 014610. – <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.103.014610>.

**АНАЛИЗ КОМПОНОВКИ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА СИСТЕМЫ
АВАРИЙНОГО И ПЛАНОВОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ РЕАКТОРА**
ANALYSIS OF THE LAYOUT OF A PLATE HEAT EXCHANGER FOR A SCHEDULED
AND EMERGENCY REACTOR COOL-DOWN SYSTEM

Федорова О.А., преподаватель СПО ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия **Fedorova O.A.**, college teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Проведен анализ основных характеристик и принципа работы пластинчатого теплообменного аппарата системы расхолаживания реактора. Приведены варианты решения проблемы выбора оптимальной компоновки теплообменника. Рассмотрены основные параметры, определяющие его эффективность. Особое внимание уделяется оптимизации геометрии пластин для достижения максимального теплообмена. Также отмечается необходимость обеспечения быстрой эффективной передачи тепла в аварийных ситуациях и поддержания оптимальной температуры в реакторной установке.

Ключевые слова: система аварийного и планового расхолаживания реактора, теплообменное устройство, компоновка пластинчатого теплообменника, холодный пакет, горячий пакет, группа пластин.

Abstract. An analysis of the main characteristics and operating principle of the plate heat exchanger of the reactor cooling system was carried out. Options for solving the problem of choosing the optimal layout of the heat exchanger are presented. The main parameters that determine its effectiveness are considered. Particular attention is paid to optimizing the geometry of the plates to achieve maximum heat transfer. The need to ensure rapid efficient heat transfer in emergency situations and maintain optimal temperature in the reactor facility is also noted.

Keywords: emergency and planned reactor cooling system, heat exchange device, plate heat exchanger layout, cold package, hot package, group of plates.

Введение

Система аварийного и планового расхолаживания (САПР) используется для снижения тепловой нагрузки на реактор при возможном перегреве внутриреакторных элементов. После остановки реактора тепло продолжает выделяться в активной зоне, и без охлаждения возможно повреждение элементов оборудования. САПР обеспечивает охлаждение первого контура во время останова реактора и перегрузки активной зоны.

Основным оборудованием рассматриваемой системы безопасности в реакторном отделении (РО) являются теплообменные устройства. Конструктивно реактор соединен с теплообменниками расхолаживания и баком запаса раствора бора трубопроводами. В современных энергоблоках для обеспечения безопасности и надежности работы часто

используются кожухотрубные теплообменники. Они играют ключевую роль в процессе охлаждения воды первого контура в случае аварий, вызванных выходом из строя трубопроводов. Кроме того, плановое расхолаживание помогает поддерживать оптимальную температуру воды и предотвращает перегрев оборудования. Однако при проведении плановых ремонтов теплообменников САПР были обнаружены коррозионные повреждения трубных досок, патрубков и крышек по причине излишней концентрации солей в технической воде. Такой дефект свойственен всем теплообменным аппаратам (ТА) реакторного отделения. Также неоднократно были зафиксированы повреждения сварных швов в связи с плотным расположением в обстройке РО.

Выбор теплообменника системы расхолаживания реактора

Пластинчатые теплообменники имеют ряд особенностей, обладающих большей практической значимостью из-за общего принципа конструирования устройств. Существенным преимуществом теплообменников такого типа является малая толщина пластин и их пакетная компоновка. Пакет теплообменника состоит из группы пластин, образующих систему параллельных каналов, через которые движется теплоноситель только в одном направлении. Эта конструкция аналогична одному проходу по трубам в кожухотрубных теплообменниках. В пластинчатых аппаратах можно использовать различные компоновки пластин, что позволяет подобрать оптимальный режим работы с максимальной теплоотдачей и минимальным гидравлическим сопротивлением.

Теплообменный аппарат должен надежно выполнять свои функции, быть компактным ввиду ограниченного размера помещений во вспомогательном корпусе и разборным для возможности дезактивировать теплообменную поверхность. Его принцип работы основан на передаче тепла между двумя средами через тонкие пластины, обеспечивая высокую теплоотдачу при минимальном объеме и весе конструкции. Схема пластинчатого теплообменника показана на рис. 1 [1].

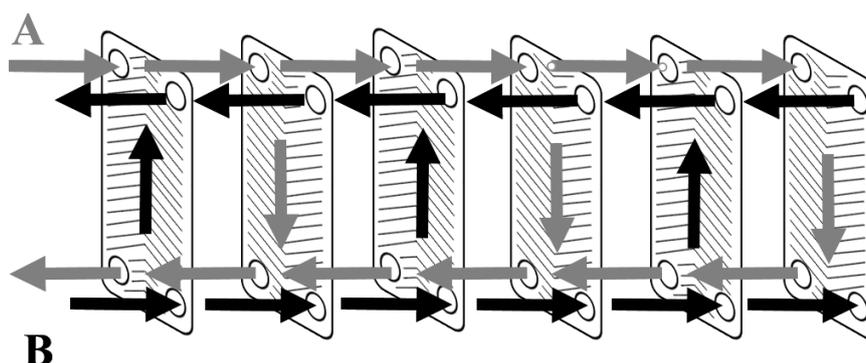


Рисунок 1 – Общая схема движения сред в пластинчатом теплообменнике

При плановом режиме работы теплообменник используется для поддержания оптимальной температуры в реакторной установке. Он осуществляет охлаждение реактора, перенося тепло от горячей системы к холодной, таким образом предотвращая перегрев и обеспечивая стабильную работу установки. В случае аварийной ситуации, когда требуется экстренное охлаждение реактора, теплообменный аппарат должен обеспечить быструю и

эффективную передачу тепла, чтобы предотвратить возможные повреждения оборудования и минимизировать риск аварийных ситуаций. Также важным аспектом является оптимизация геометрии пластин для максимальной эффективности теплообмена.

В качестве рабочей поверхности теплообменника самым распространённым типом пластин является сетчато-поточный (рис. 2). В данной компоновке пластин поток движется в двух плоскостях, что существенно интенсифицирует теплообмен и уменьшает удельную рабочую поверхность теплообменника. Кроме этого, сетчатый профиль существенно увеличивает жесткость и прочность аппарата, что позволяет выполнять свои функции при достаточно высоких давлениях.

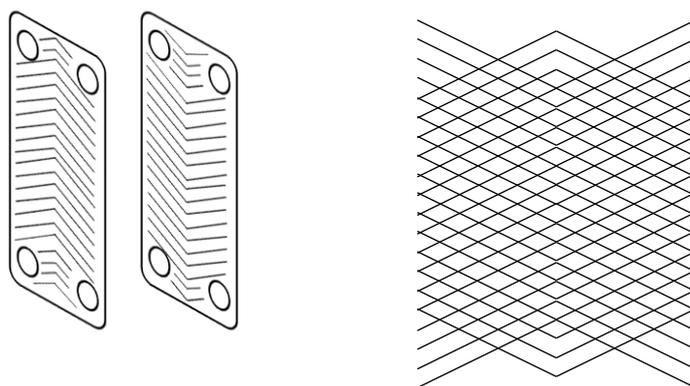


Рисунок 2 – Сетчато-поточная пластина

Гофры в ёлку образуют щелевидные пластинчатые каналы для движения жидкости, которые имеют повторяющийся профиль. При этом площадь сечения остается постоянной по ходу движения. Геометрические параметры определяют не только эффективность теплообмена, но и его гидравлические характеристики и, в конечном счёте, экономическую эффективность работы оборудования. Все это помогает создать теплообменные системы, отвечающие определенным требованиям и обеспечивающие максимальную эффективность. Основные геометрические характеристики теплообменника приведены в табл. 1 [2].

При расчёте геометрических характеристик теплообменника число необходимых пакетов может оказаться дробным. В таком случае возникает вопрос о выборе оптимальной компоновки теплообменника. Варианты решения данной проблемы включают в себя возможность использования либо одного, либо двух пакетов в конструкции теплообменника. Каждая из этих альтернатив имеет свои достоинства и ограничения, которые необходимо учитывать при принятии решения. Такой подход позволяет обеспечить оптимальную эффективность работы теплообменного оборудования и максимальное соответствие требованиям конкретного проекта [1].

Схема теплообменника с одним холодным и одним горячим пакетом представляет собой классическую конфигурацию, где тепло передается между двумя средами через один холодный и один горячий пакет (рис. 3). В свою очередь, схема теплообменника с двумя холодными и двумя горячими пакетами представляет собой более сложную конфигурацию, которая позволяет более эффективно использовать поверхность теплообмена и увеличить производительность системы (рис. 4).

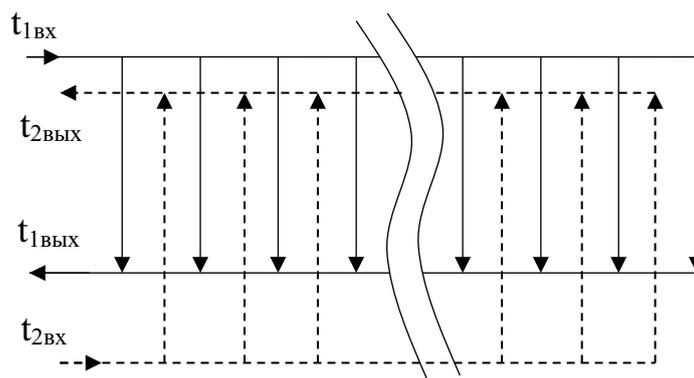


Рисунок 3 – Теплообменник с одним холодным и одним горячим пакетом

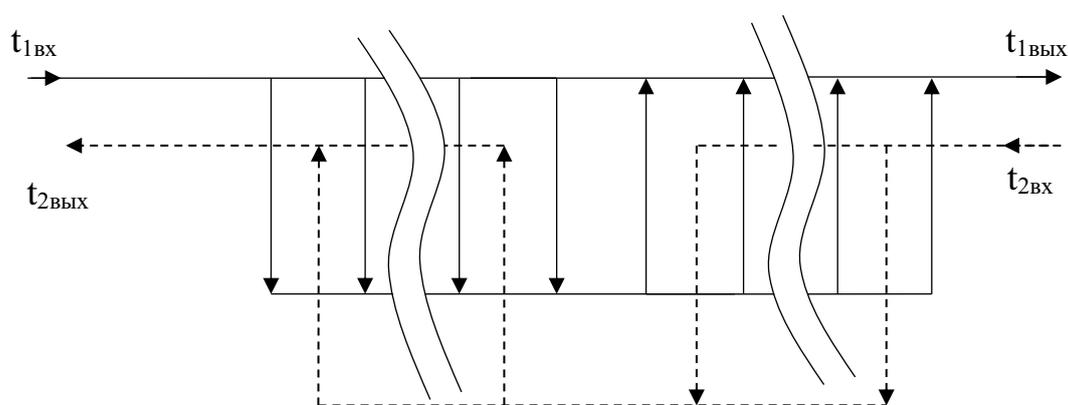


Рисунок 4 – Теплообменник с двумя холодными и двумя горячими пакетами

Рассмотрим основные параметры различных вариантов компоновки пластинчатых теплообменников. Эти параметры включают в себя площадь поперечного сечения, скорость среды, гидравлическое сопротивление, коэффициент теплоотдачи и необходимую рабочую поверхность. Каждый из перечисленных параметров играет ключевую роль в определении эффективности теплообменника. Важно подобрать оптимальные значения этих параметров для обеспечения максимальной производительности системы теплообмена [3].

Площадь поперечного сечения теплообменника зависит от числа параллельных каналов в пакете и площади сечения всего канала, м²:

$$f'_{\Pi} = m_{\Pi} \cdot f_k. \quad (1)$$

Скорость среды в теплообменнике оказывает влияние на эффективность теплообмена и распределение тепловых потоков, м/с [4]:

$$w = \frac{V}{f'_{\Pi}}, \quad (2)$$

где V – объемный расход рабочей среды, м³/с.

Гидравлическое сопротивление определяет энергетические затраты на преодоление сопротивления движению среды в теплообменнике, кПа [5]:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{L_{\Pi}}{d_3} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot X, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент общего гидравлического сопротивления относительно длины межпластинчатого канала; L_{Π} – приведенная длина межпластинчатого канала, м; $d_э$ – эквивалентный диаметр, м; ρ – плотность потока, кг/м³; X – число пакетов в секции.

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность теплообмена, Вт/м²·°С [4]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи рабочих сред, Вт/м²·°С.

Необходимая рабочая поверхность определяется исходя из тепловых нагрузок и требуемой эффективности теплообмена, м²:

$$F_{\alpha} = \frac{Q}{k \cdot \Delta \bar{t}}, \quad (5)$$

где Q – тепловая мощность каждой ветки системы, Вт; $\Delta \bar{t}$ – средний логарифмический температурный напор, °С.

Результаты расчета основных параметров вариантов компоновки пластинчатого теплообменника приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Варианты компоновки теплообменника

Параметр	1 вариант ($X = 1$)		2 вариант ($X = 2$)	
	горячий	холодный	горячий	холодный
Площадь поперечного сечения, м ²	0,212	0,213	0,106	0,107
Скорость среды, м/с	0,223	1,524	0,445	3,026
Гидравлическое сопротивление, кПа	31,1	1140	35,1	1293
Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·С	2778,9		2876,6	
Необходимая рабочая поверхность, м ²	142,8		138,0	
Число пластин в теплообменнике	269		269	

Расчет двух вариантов компоновки пластинчатого теплообменника показал, что вариант с двумя пакетами по горячему и холодному потокам имеет более высокий коэффициент теплоотдачи и меньшую необходимую рабочую поверхность теплообмена. Однако, при этом увеличивается гидравлическое сопротивление аппарата. Также, следует учитывать, что теплообменник с двумя пакетами требует большей металлоёмкости, к тому же такие теплообменники не производят серийно, что значительно увеличит их стоимость.

Заключение

На основе проведённого анализа можно сделать вывод о том, что выбор подходящего варианта компоновки будет зависеть от конкретных условий эксплуатации и требований к теплообменнику. Если необходимо повысить коэффициент теплоотдачи и уменьшить рабочую поверхность, то можно рассмотреть вариант с двумя пакетами. В случае, если важными факторами являются стоимость и гидравлическое сопротивление, оптимальным может оказаться более простой и компактный вариант с одним пакетом.

В любом случае, перед принятием решения необходимо провести дополнительные расчеты и оценку других аспектов, чтобы выбрать наиболее эффективный вариант компоновки пластинчатого теплообменника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование теплообменных аппаратов АЭС / Ф.М. Митенков, В.Ф. Головки, П.А. Ушаков, Ю.С. Юрьев ; под общ. ред. Ф.М. Митенкова. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 296 с.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037730> (дата обращения: 10.04.2024).
3. Кириллов, П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – 2-е изд., перераб. и доп. / П.Л. Кириллов – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
4. Кириллов, П.Л. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках / П.Л. Кириллова, Г.П. Богословская. – Москва: Энергоатомиздат, 2000. – 456 с.
5. Одельский, Э.Х. Гидравлический расчет трубопроводов разного назначения / Э.Х. Одельский. – Минск: Высшая школа, 1967. – 114 с.

REFERENCES

1. Design of Heat Exchangers for Nuclear Power Plants / F.M. Mitenkov, V.F. Golovko, P.A. Ushakov, Yu.S. Yuryev; edited by F.M. Mitenkov. – Moscow: Energoatomizdat, 1988. – 296 p.
2. Strength Calculation Standards for Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants (PNAE G-7-002-86). – Moscow: Energoatomizdat, 1989. – 525 p. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037730> (accessed: 10.04.2024).
3. Kirillov, P.L. Handbook of Thermal-Hydraulic Calculations (Nuclear Reactors, Heat Exchangers, Steam Generators). – 2nd ed., revised and add. / P.L. Kirillov. – Moscow: Energoatomizdat, 1990. – 360 p.
4. Kirillov, P.L. Heat and mass transfer in nuclear power plants / P.L. Kirillova, G.P. Bogoslovskaya. – Moscow: Energoatomizdat, 2000. – 456 p.
5. Odelsky, E.Kh. Hydraulic calculation of pipelines for various purposes / E.Kh. Odelsky. – Minsk: Higher School, 1967. – 114 p.

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА ПРИ РАЗРАБОТКЕ
ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РОБОТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО
КОМПЛЕКСА**

**APPLICATION OF ENGINEERING ANALYSIS SYSTEMS IN THE DEVELOPMENT
OF THE MAIN ELEMENTS OF A ROBOTIC MEASURING COMPLEX**

Жуков Д.С., аспирант ФГБОУ ВО "Вологодский государственный университет", Вологда, Россия

Zhukov D.S., postgraduate student, Vologda State University, Vologda, Russia

Швецов А.Н., доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО "Вологодский государственный университет", Вологда, Россия

Shvetcov A.N., DrSc in Technical Sciences, Professor, Professor, Vologda State University, Vologda, Russia

Аннотация. В статье приводятся расчеты проектируемых основных элементов роботизированного измерительного комплекса с помощью систем инженерного анализа. К основным элементам комплекса относятся держатель и позиционер. Деталь «Держатель» рассчитывается по линейному статическому анализу методом конечных элементов для определения перемещения под цифровой индикатор посадочного места, которое ведет к отклонению измеряемого штока, влияющего на погрешность результата измерения. Для устройства «Позиционер» выполнен динамический анализ механизма по геометрической модели с инерционными значениями и вращающегося звена с целью подбора шагового двигателя на основе выходного значения крутящего момента.

Ключевые слова: роботизированный комплекс, система инженерного анализа.

Abstract. The paper presents calculations of the designed basic elements of the robotic measuring complex using engineering analysis systems. The main elements of the complex include: holder and positioner. The part "Holder" is calculated by linear static analysis, by the finite element method to determine the movement of the seat for the digital indicator, which leads to the deviation of the measured rod, affecting the error of the measurement result. For the device "Positioner" the dynamic analysis of the mechanism by geometric model, inertial parameters and rotating link is performed in order to select a stepper motor based on the output torque value of the link.

Keywords: robotic complex, computer aided engineering.

На стадии проектирования жизненного цикла изделия необходимо выполнить расчет системами инженерного анализа, который направлен на сокращение экспериментальных образцов и выявление проблем до производства продукции. Система инженерного анализа (Computer Aided Engineering) – программное обеспечение, включающее расчетные модули, позволяющие оценить, как поведет себя компьютерная модель изделия в реальных условиях эксплуатации [1].

В данной статье приводятся расчеты перемещения детали «Держатель» под нагрузкой и динамического анализа устройства «Позиционер» для определения крутящего момента роботизированного измерительного комплекса.

Роботизированный измерительный комплекс состоит из электронного блока, позиционера, контролера R-30iB, пульта управления и персонального компьютера (ПК) (см. рис. 1). Комплекс предназначен для выполнения контрольно-измерительных операций линейных размеров с диапазоном от 0 до 25 мм, корпусных изделий машиностроения массой до 6 кг и габаритными размерами 300 мм в длину и 300 мм в ширину.

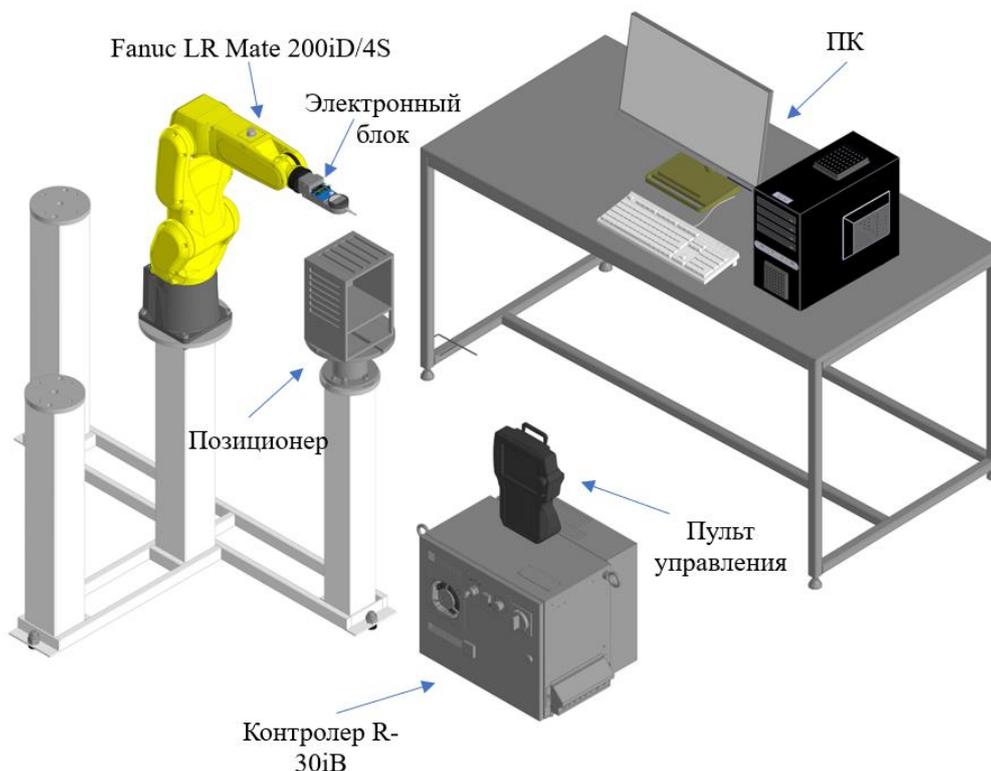


Рисунок 1 – Роботизированный измерительный комплекс

Электронный блок, показанный на рис. 2, состоит из детали «Держатель», измерительного устройства и электронной платы.

Электронный блок закрепляется на эффектор промышленного робота посредством приспособления «Держатель» 1, показанного на рис. 3. Приспособление спроектировано с учетом работы промышленных роботов, обеспечивает постоянство положения центральной точки инструмента на конце штока измерительного устройства с записанными ее координатами в контролере.

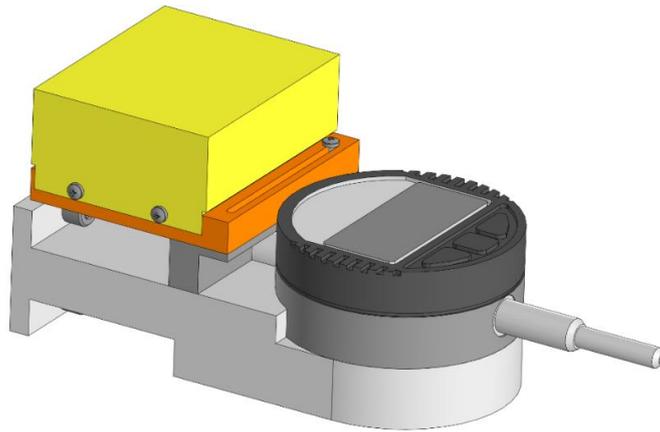


Рисунок 2 – Электронный блок

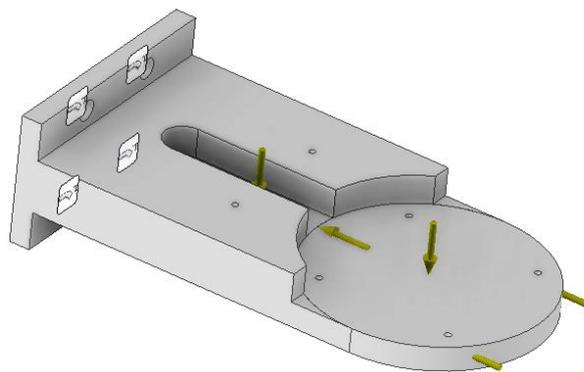


Рисунок 3 – Деталь «Держатель»

При разработке детали «Держатель» необходимо проанализировать перемещение посадочного места под цифровой индикатор, которое ведет к отклонению измеряемого штока, влияющего на погрешность результата измерения. Основные факторы, оказывающие влияние на угловое перемещение посадочного места: сила тяжести держателя, вес цифрового индикатора.

Перемещение детали «Держатель» рассчитывалось линейным статическим анализом методом конечных элементов. Расчет производился в системе Autodesk Inventor модулем «Анализ напряжений». С помощью этого модуля пользователь может моделировать поведение детали или узла под нагрузкой, определять наличие деформаций, их степень и характер [2].

Цикл расчета в системах инженерного анализа для определения напряженного деформированного состояния методом конечного элементного анализа показан на рис. 4.

Граничными условиями, характеризующими нагрузки и ограничения степеней свободы для данной модели, являются:

- жесткое крепление в местах винтового соединения;
- сила, с которой давит индикатор на стенки держателя, 2 Н;
- вес индикатора на посадочное место, 3 Н;
- сила тяжести самого держателя.

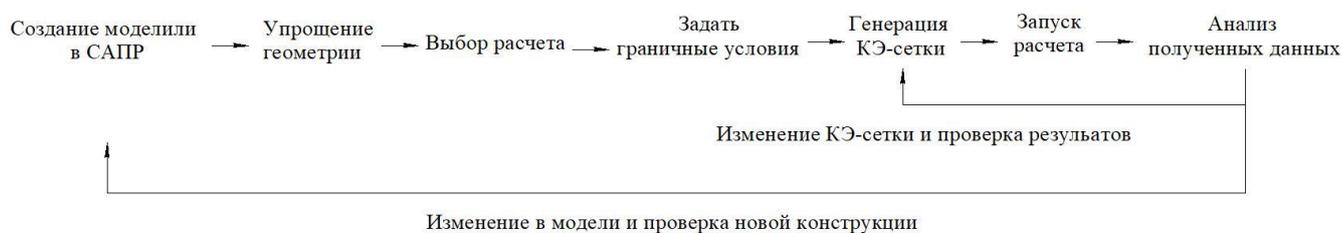


Рисунок 4 – Цикл расчетов методом конечного элементного анализа



Рисунок 5 – Сгенерированная сетка конечных элементов для детали «Держатель»

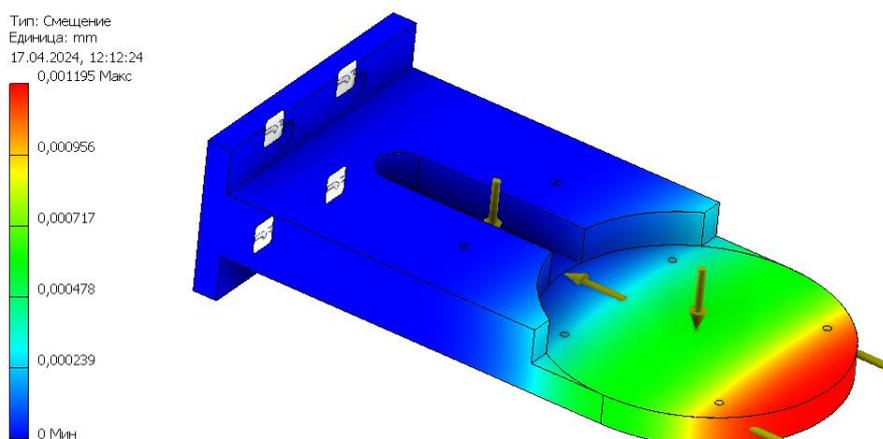


Рисунок 6 – Результаты значения перемещения

Сгенерированная сетка конечных элементов показана на рис. 5. Полученные результаты перемещения показаны на рис. 6.

Верификация результатов заключается в проверке расчетов полученной модели, например, путем анализа сходимости элементов, проверки суммарной массы изделия, проверки контактов закрепления и т.д. После нескольких расчетов максимальное значение перемещения составляет около 0,0012 мм, что говорит о нецелесообразности дальше измельчать сетку конечных элементов.

Данные перемещения были отражены на 3D модели и произведено сравнение с моделью без перемещения. Визуализация отклонения показана на рис. 7.

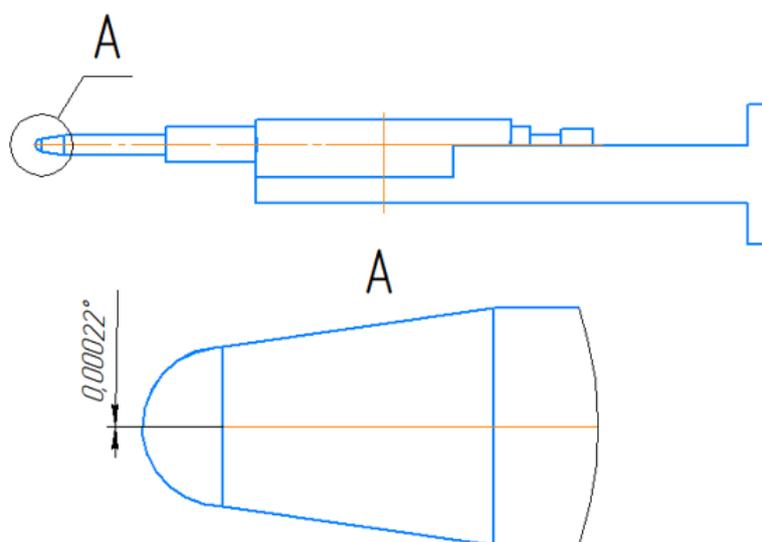


Рисунок 7 – Визуализация отклонения изменяемого штока

По результату анализа напряженно деформированного состояния детали «Держатель» можно сделать вывод, что погрешностью, образующейся перемещением посадочного места толщиной 6 мм под цифровой индикатор в результате приложенной нагрузки, можно пренебречь.

Для устройства «Позиционер», показанного на рис. 8, был выполнен динамический анализ механизма в модуле Simulink прикладной программы MATLAB с целью определения крутящего момента. Модуль может симулировать кинематические и динамические свойства роботов и других систем. Моделями являются rigidBodyTree объекты, содержащие rigidBody и rigidBodyJoint элементы с инерционными свойствами [3]. К предъявляемым требованиям при разработке устройства относится вращение измеряемых деталей массой до 6 кг с габаритными размерами до 300×300 мм.

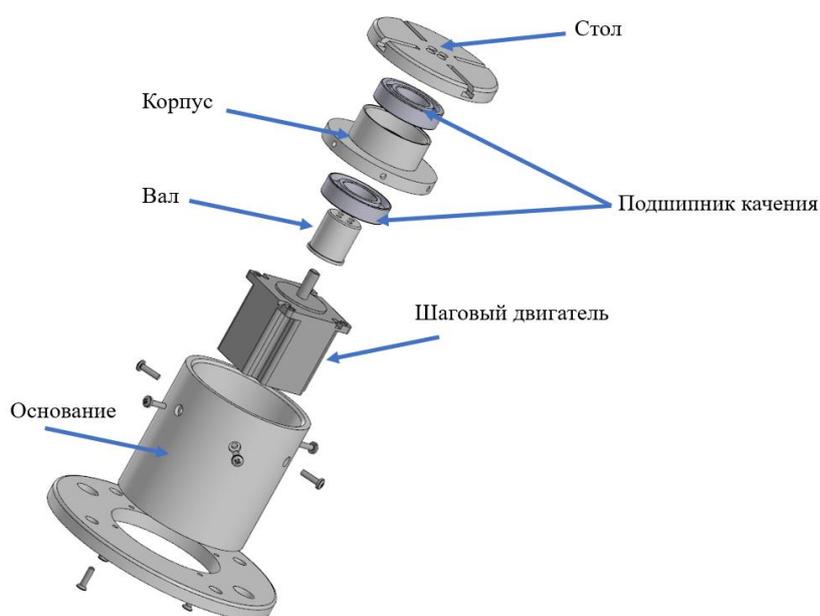


Рисунок 8 – Устройство «Позиционер»

Многозвенная механическая модель устройства «Позиционер» состоит из блоков, содержащих информацию о структуре, свойствах и геометрии деталей, а также сопряжений, заданных в системе автоматизированного проектирования [4]. Структурная модель показана на рис. 9.

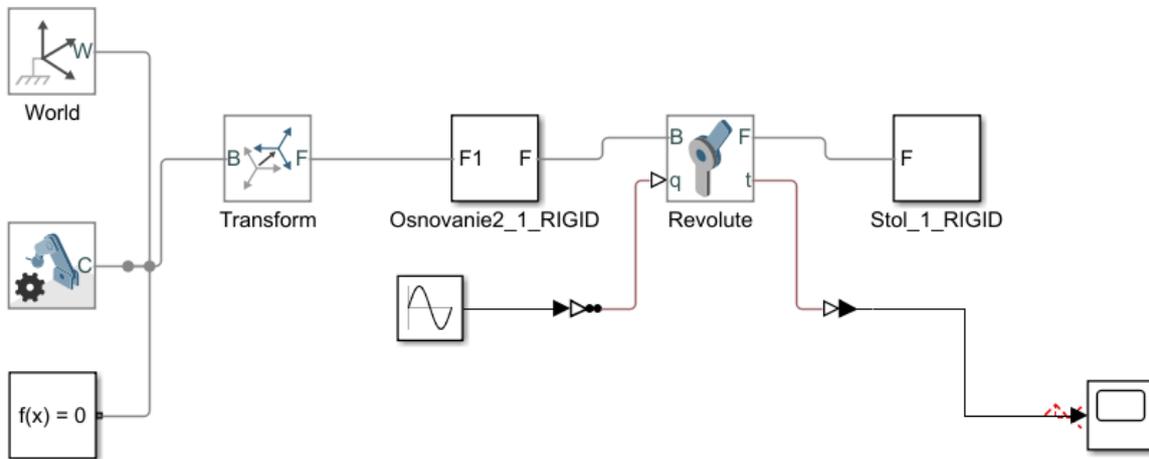


Рисунок 9 – Структурная схема устройства «Позиционер»

Результаты крутящего момента вращающегося звена показаны на рис. 10 и 11. Значение крутящего момента в момент начала движения с установленной измерительной деталью составляют 5 Н·м при вращении со скоростью 0.1 рад/с. Выходное значение крутящего момента зависит от заданной скорости.

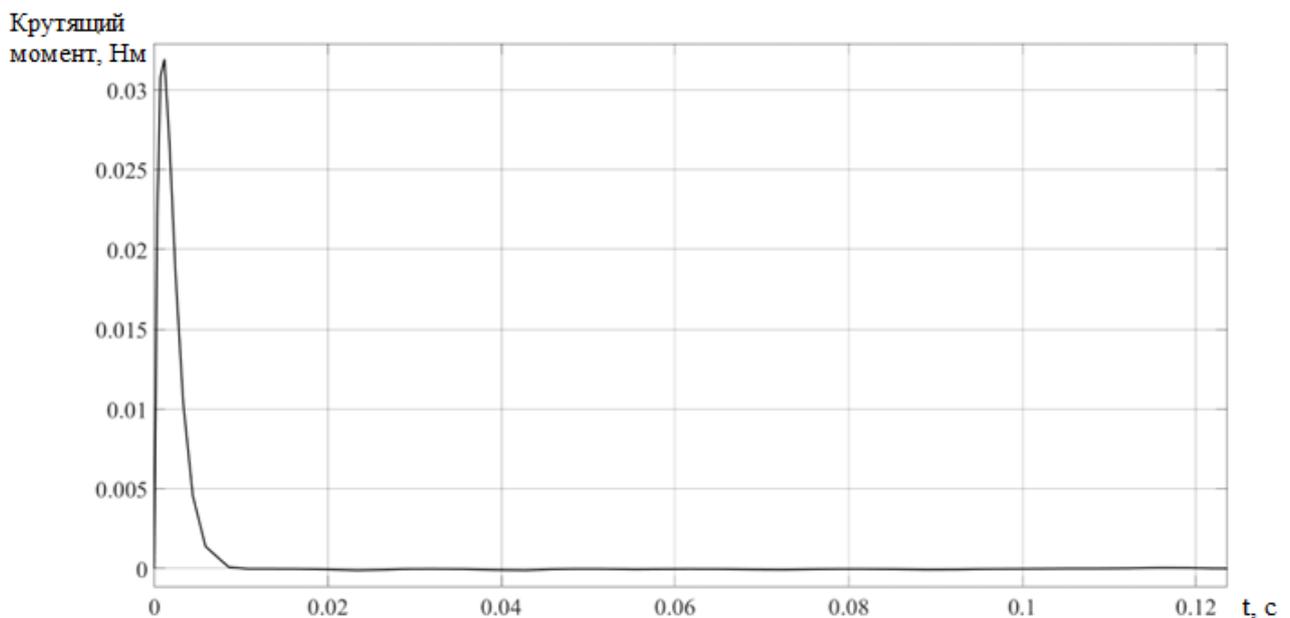


Рисунок 10 – Значения крутящего момента без установленной детали

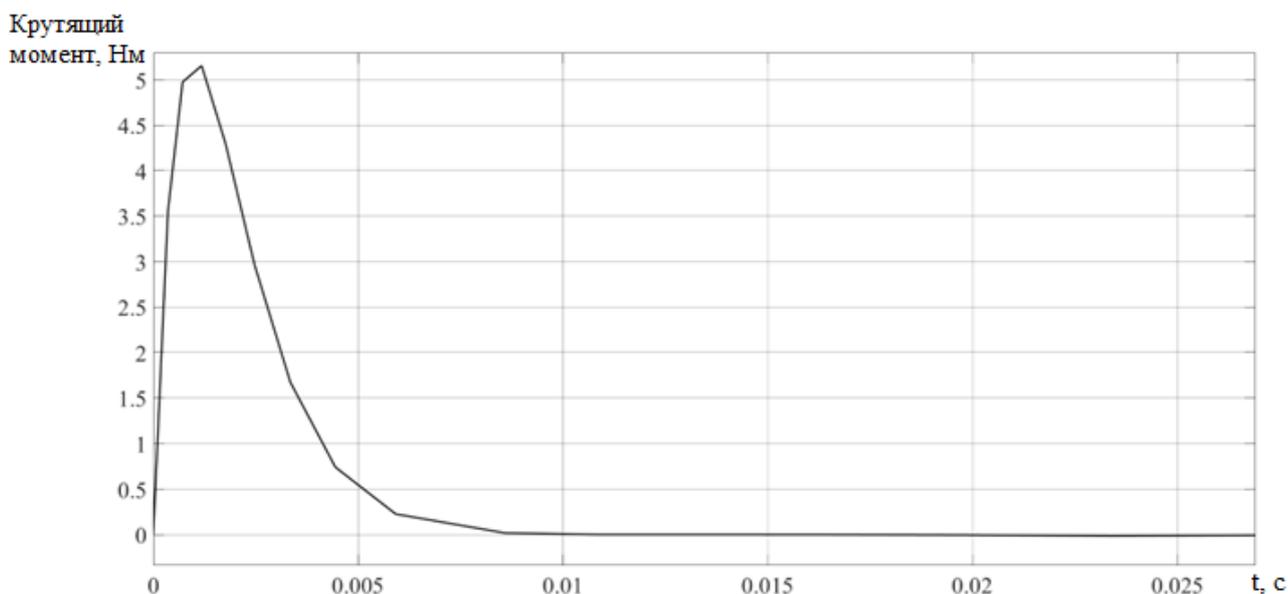


Рисунок 11 – Значения крутящего момента с установленной деталью

Также был проведен теоретический расчет требуемого крутящего момента по материалам [5]. Значение крутящего момента составило 0.58 Н·м при частоте вращения 13.33 оборотов в минуту.

Вывод

На стадии проектирования изделий необходимо выполнить расчет в системах инженерного анализа с целью в дальнейшем сократить количество экспериментальных образцов и затрат на их создание, а также выявить проблемы на ранних этапах. С помощью систем инженерного анализа для роботизированного измерительного комплекса был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния детали «Держатель» и динамический анализ устройства «Позиционер».

Расчет напряженного-деформированного состояния показывает, что возникающая погрешность приспособления «Держатель», вызванная перемещением посадочного места в результате приложенной нагрузки, пренебрежимо мала и не влияет на результат измерения.

Динамический анализ крутящего момента механической модели «Позиционер», включающий информацию о структуре, свойствах, геометрии деталей и сопряжений, имеет значение 5 Н·м при вращении со скоростью 0.1 рад/с для измеряемой детали массой 6 кг с габаритными размерами до 300×300 мм. Изменяя количество оборотов в минуту, можно выбрать оптимальное значение крутящего момента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукинских, С.В. Компьютерное моделирование и инженерный анализ в конструкторско-технологической подготовке производства : учебное пособие / С.В. Лукинских. – Екатеринбург : УрФУ, 2020. – 168 с.
2. Описание возможностей программы Autodesk Inventor. – URL: <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2024/RUS/?guid=GUID-61F01A5D-7E54-45A1-9698-7BB11F0AEE94> / (дата обращения 01.04.2024).

3. Описание возможностей программы MATLAB. – URL: <https://docs.exponenta.ru/robotics/robot-models.html?ysclid=lv5q4hlq84601236347> / (дата обращения 08.04.2024).

4. Борисов, И.И. Имитационное моделирование мехатронных систем : учебное пособие / И.И. Борисов, С.А. Колюбин. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2020. – 103 с.

5. Фирма Oriental motor. Технический справочник по шаговым двигателям. – URL: <http://instrumentalist.ru/-StartID=3&ID=41&CategoryID=40.htm/> (дата обращения 10.03.2024).

REFERENCES

1. Lukinskikh, S.V. Computer modeling and engineering analysis in design and technological preparation of production: a tutorial / S.V. Lukinskikh. – Ekaterinburg: UrFU, 2020. – 168 p.

2. Description of the capabilities of the Autodesk Inventor program. – URL: <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2024/RUS/?guid=GUID-61F01A5D-7E54-45A1-9698-7BB11F0AEE94> / (date of access 01.04.2024).

3. Description of the capabilities of the MATLAB program. – URL: <https://docs.exponenta.ru/robotics/robot-models.html?ysclid=lv5q4hlq84601236347> / (date of access 08.04.2024).

4. Borisov, I.I. Simulation modeling of mechatronic systems: a tutorial / I.I. Borisov, S.A. Kolyubin. – St. Petersburg: ITMO University, 2020. – 103 p.

5. Oriental motor company. Technical reference book on stepper motors. – URL: <http://instrumentalist.ru/-StartID=3&ID=41&CategoryID=40.htm/> (date of access 10.03.2024).

**КРАШЕНИЕ ХЛОПКОЛАВСАНОВОЙ ТКАНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЧЕТВЕРТИЧНЫХ АММОНИЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**
DYEING OF COTTON AND DACRON FABRIC USING QUATERNARY AMMONIUM
COMPOUNDS

Серова Н.Е., ассистент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия

Киселев А.М., доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия

Михайловская А.П., доктор технических наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия

Serova N.E., Assistant, Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Saint-Petersburg, Russia

Kiselev A.M., DrSc in Technical Sciences, Professor, Professor, Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Saint-Petersburg, Russia

Mikhailovskaya A.P., DrSc in Technical Sciences, Docent, Professor, Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Saint-Petersburg, Russia

Аннотация. Представлены результаты исследования интенсифицирующего влияния четвертичных аммониевых солей при крашении хлопкополиэфирной ткани смесью дисперсных и активных красителей по периодическому однованному способу.

Ключевые слова: смесовая ткань, крашение, интенсификация, дисперсный и активный красители, четвертичная аммониевая соль, технология.

Abstract. The results of the intensifying effect of quaternary ammonium salts in dyeing cotton-polyester fabric with a mixture of dispersed and active dyes study using a periodic single-step method have presented.

Keywords: blended fabric, dyeing, intensification, dispersed and active dyes, quaternary ammonium salt, technology.

Сложность окрашивания тканей смешанного состава, в которых присутствуют волокна хлопка и полиэстера, связана с тем, что эти волокна по своей структуре и физико-химическим свойствам противоположны, и такая противоположность требует особого подхода к процессу крашения. Одним из возможных решений этой актуальной проблемы является использование модификаторов-интенсификаторов на основе четвертичных аммониевых соединений (ЧАС). Исследуемые галогениды четвертичного аммония являются низко токсичными веществами и обладают интенсифицирующим действием в крашении обеих волокнистых составляющих смесовой ткани [1].

Разработка технологии окрашивания смесовых тканей с использованием четвертичных аммониевых солей позволит улучшить качество окрашивания хлопколавсановых тканей, повысить эффективность использования ресурсов и уровень экологической безопасности

производства, а также решить проблему перекрашивания текстильных изделий из хлопколавсановой ткани на предприятиях бытового обслуживания.

Для разработки технологии крашения смесовой хлопколавсановой ткани изучены особенности крашения каждого компонента смеси – полиэфирного (ПЭ) и целлюлозного волокон, а также свойства четвертичных аммониевых соединений (ЧАС).

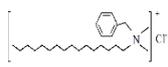
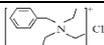
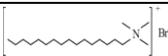
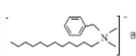
Сначала рассматривался метод крашения полиэфирной составляющей, так как она имеет более низкую реакционную способность и требует особые условия для эффективного окрашивания. При этом проанализированы различные технологии колорирования полиэфирных материалов, включая характеристика красителей и интенсификаторов [1].

После этого исследовалась технология крашения целлюлозной составляющей, которая имеет более высокую реакционную способность и лучше окрашивается по сравнению с полиэфирной. Были опробованы типовые методы крашения с использованием различных технологических процессов крашения активными красителями.

После анализа этих способов поставлена задача создания совместной технологии крашения, которая учитывает особенности каждого волокнистого компонента и позволяет получить равномерное и стойкое окрашивание смесовой ткани [2].

При крашении полиэфирной (лавсановой) составляющей использовались дисперсные красители с азо- и антрахиноновой хромофорной системой, соответственно, алый полиэфирный, темно-синий полиэфирный и желтый полиэфирный. Используемые интенсификаторы: четвертичные аммониевые соединения с различной углеводородной частью и галогеновыми противоионами и традиционные «переносчики» представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Четвертичные аммониевые соли и традиционные химические интенсификаторы

Четвертичная аммониевая соль	Условное обозначение	Строение молекулы
Хлорид бензилдиметилцетиламмония (ХБДДМЦА)	BnC_{16}Cl	
Хлорид бензилтриэтиламмония (ХБТЭА)	BnCl	
Бромид триметилцетиламмония (БТМЦА)	C_{16}Br	
Бромид бензилдиметилдодециламмония (ББДМДДА)	BnC_{12}Br	
β -нафтол	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}$	
Салициловая кислота	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$	

ЧАС – это соединения, содержащие положительно заряженный атом азота, ковалентно связанный с 4 органическими радикалами. При увеличении длины радикалов молекулы ЧАС начинают приобретать поверхностно-активные свойства, что обуславливает их широкое применение в различных отраслях промышленности и органической химии [3].

ЧАС, содержащие хотя бы один длинноцепной углеводородный радикал ($R > 10$), в растворах проявляют поверхностно-активные свойства: снижают поверхностное натяжение растворителя, ускоряют смачивание, способствуют пенообразованию, эмульгированию и диспергированию. Однако моющее действие катионных ПАВ является относительно слабым. Благодаря наличию положительного заряда в молекуле ЧАС, они способны адсорбироваться на отрицательно заряженных поверхностях, например, на белковых и целлюлозных волокнах.

С целью установления межмолекулярного взаимодействия между интенсификатором и красителем методом динамического рассеяния света определялся размер частиц индивидуальных компонентов системы и бинарной системы до и после нагревания раствора (см. рис. 1). Установлено, что в водном растворе краситель алый ПЭ, в основном, находится в виде ассоциатов, средний размер частиц, которых оставляет около 123 нм. Интенсификатор (в данном случае, хлорид бензилдиметилцетиламмония) находится в молекулярной форме с размером частиц 8 нм. При взаимодействии красителя и хлорида четвертичного аммония уменьшается доля ассоциатов красителя и молекул интенсификатора, при этом образуются частицы размером 812 нм, т.е. происходит процесс агрегации. После нагревания доля молекул интенсификатора и ассоциатов красителя практически сводится к нулю, а размер агрегатов увеличивается до 1 мкм.

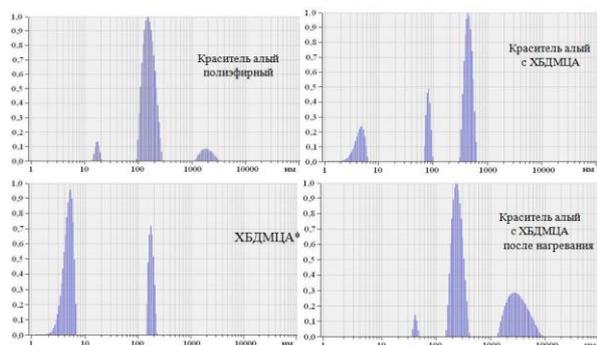


Рисунок 1 – Изменение размера частиц в системе «дисперсный краситель алый ПЭ - интенсификатор ХБДМЦА»

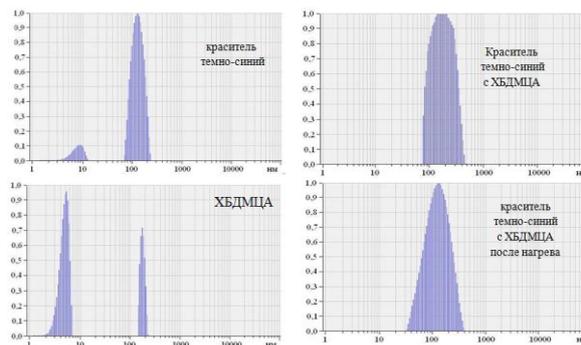
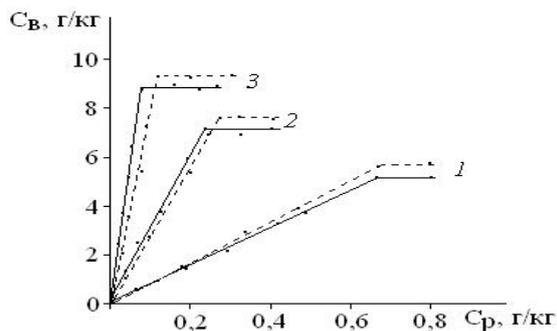


Рисунок 2 – Изменение размера частиц в системе «дисперсный краситель темно-синий ПЭ - интенсификатор ХБДМЦА»

Аналогичную зависимость можно проследить в системе «хлорид бензилдиметилцетиламмония - дисперсный темно-синий ПЭ» (см. рис. 2). Полученные результаты показали, что в водном растворе хлорида бензилдиметилцетиламмония дисперсный краситель имеет сложную сольватную оболочку из молекул и ионов четвертичного аммониевого соединения и воды. При этом четвертичная аммониевая соль взаимодействует с кислотными функциональными группами красителя за счет сил Ван-дер-Ваальса и контактирующих гидрофобных фрагментов, а вода локализуется вблизи основных заместителей (ауксохромных групп). Таким образом, наличие межмолекулярного взаимодействия в водных растворах интенсификатора и дисперсного красителя обуславливает построение технологии периодического крашения смесовой хлопко-полиэфирной ткани с последовательным введением компонентов в красильную ванну (сначала интенсификатор, а затем краситель).

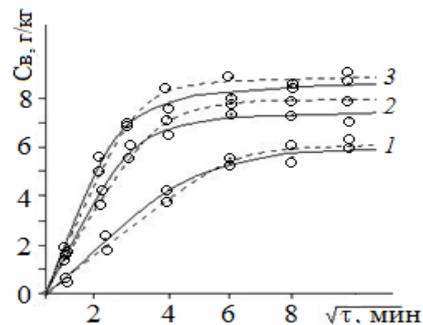
На основании определения оптической плотности остаточных красильных ванн выстроены равновесные изотермы сорбции (рис. 3) и сравнительные кинетические кривые сорбции (рис. 4) дисперсных красителей полиэфирным волокном в присутствии катионоактивных четвертичных аммониевых солей.

Изучение кинетических кривых сорбции показывает, что сорбция четвертичных аммониевых солей полиэфирным волокном достигает максимума (65 и 57 мг/г волокна) при продолжительности обработки 25-30 минут, что приблизительно соответствует режиму периодического процесса крашения при 100 °С. При этом скорость диффузии интенсификаторов выше скорости диффузии молекул дисперсных красителей на 2-3 порядка.



-----дисперсный алый полиэфирный
 - - - - дисперсный темно-синий ПЭ

Рисунок 3 – Равновесные изотермы сорбции дисперсных красителей ПЭ волокном: 1 – без интенсификатора; 2 – БТМЦА; 3 – ХБДМЦА



----- алый полиэфирный
 - - - - -темно-синий ПЭ

Рисунок 4 – Кинетические кривые выбора дисперсных ПЭ красителей полиэфирным волокном: 1 – без интенсификатора; 2 – БТМЦА; 3 – ХБДМЦА

Анализ полученных линейных изотерм сорбции исследуемых красителей на полиэфирном волокне свидетельствует о их диффузионном распределении в субстрате в соответствии с законом Генри-Нернста. Повышение содержания красителя на волокне при крашении в присутствии четвертичных аммониевых солей подтверждает их интенсифицирующее действие в процессах крашения полиэфирных волокнистых материалов. На основании полученных зависимостей рассчитаны величины стандартного термодинамического сродства ($-\Delta\mu^0$) красителей к полиэфирному волокну и значения их кажущегося коэффициента диффузии (D) (см. табл. 2).

Также проведено сравнительное крашение в присутствии рекомендуемых и традиционных интенсификаторов. Установлено, что интенсифицирующая эффективность действия предлагаемых интенсификаторов на основе четвертичных аммониевых солей (бромид триметилцетиламмония и, особенно, хлорида бензилдиметилцетиламмония) сопоставима с традиционными «переносчиками» (бета-нафтолом и салициловой кислотой).

Таблица 2 – Значения стандартного термодинамического средства ($-\Delta\mu^\circ$) и кажущегося коэффициента диффузии (D) дисперсных красителей по отношению к полиэфирному волокну

Дисперсный краситель	Интенсификатор	$-\Delta\mu^\circ$, кДж/моль	$D \cdot 10^8$, см ² /с
Алый полиэфирный	без интенсификатора	7,913	4,17
	ХБДМЦА	10,057	3,35
	БТМЦА	9,537	0,53
Темно-синий полиэфирный	без интенсификатора	10,841	4,12
	ХБДМЦА	19,450	2,81
	БТМЦА	18,307	0,96

Но следует отметить, что рекомендуемые интенсификаторы на основе четвертичных аммониевых солей, в отличие от полярных органических веществ, менее токсичны.

Для определения оптимальной продолжительности крашения образцы полиэфирного волокна окрашивались раствором красителя и интенсификатора в течение различных периодов времени – от 20 до 70 минут с интервалом в 10 минут. По результатам измерений интенсивности полученных окрасок оптимальное время крашения составляет 40 минут.

По спектрам отражения образцов полиэфирной ткани, окрашенной в присутствии рекомендуемых интенсификаторов при температурах 90, 95 и 100°C установлено, что повышение температуры крашения увеличивает окрашиваемость полиэфирного материала, что связано с ростом подвижности молекул интенсификатора, красителя и сегментов макромолекул полиэтилентерефталата в интервале температур 80-100°C. В присутствии интенсификатора (хлорида бензилдиметилцетиламмония) окраски высокого качества могут быть получены при температуре 95°C (рис. 5).

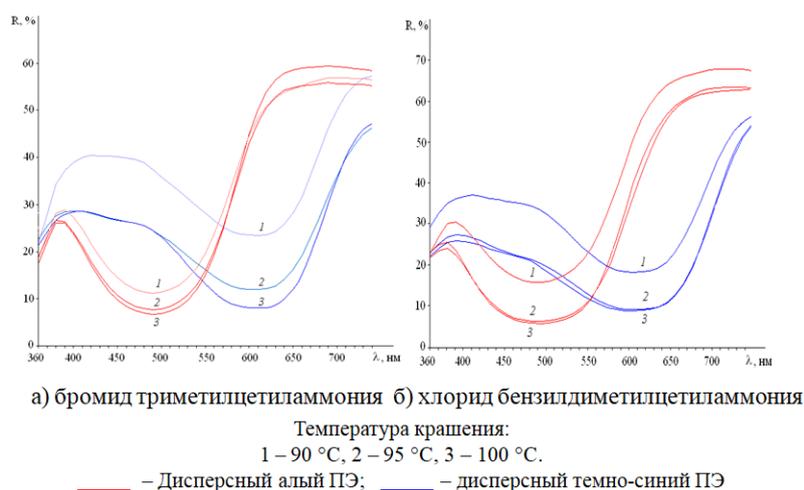


Рисунок 5 – Спектры отражения полиэфирных образцов, окрашенных в присутствии четвертичных аммониевых соединений

В итоге, проведено сравнение разработанной технологии крашения лавсановой составляющей с применением рекомендуемых и традиционных интенсификаторов. Определены оптимальные параметры процесса крашения, а именно: концентрация

интенсификатора 1 г/л, время крашения 40 минут, температура 95 °С. При приготовлении красильной ванны рекомендовано введение, в первую очередь, интенсификатора, а затем дисперсного красителя (см. табл. 3). интенсификаторов на основе четвертичных аммониевых солей (бромид триметилцетиламмония и, особенно, хлорида бензилдиметилцетиламмония). Эффективность действия ЧАС сопоставима с традиционными «переносчиками» (бета-нафтолом и салициловой кислотой). но предлагаемые интенсификаторы на основе четвертичных аммониевых солей более доступны, имеют низкую стоимость и менее токсичны.

Таблица 3 – Сравнение эффективности действия интенсификаторов

Интенсификатор	Интенсивность краски	Устойчивость окраски, балл	
		к стирке	к трению
Дисперсный темно-синий полиэфирный			
Салициловая кислота	46,12	5/5/5	5
β -Нафтол	44,78	5/5/5	5
ХБДМЦА	46,54	5/5/5	5
Дисперсный алый полиэфирный			
Салициловая кислота	65,00	4/5/4	4
β -Нафтол	62,63	4/5/4	4
ХБДМЦА	64,71	4/5/4	4
Дисперсный желтый 43			
Салициловая кислота	74,68	5/5/5	5
β -Нафтол	74,05	5/5/5	5
ХБДМЦА	75,12	5/5/5	5

Определение основных физико-механических показателей (разрывной нагрузки и относительного удлинения при разрыве) свидетельствует о том, что применение интенсификаторов на основе четвертичных аммониевых солей обеспечивает лучшее сохранение физико-механических свойств окрашенного материала по сравнению с использованием традиционного «переносчика» (салициловой кислоты): обработка салициловой кислотой снижает прочность окрашенной ткани на 10.8% по основе и на 6.3% по утку, а применение катионных аммониевых соединений, соответственно, на 5-8 и 2-3% (см. табл. 4).

При колорировании гидрофильных целлюлозных волокон, обладающих высокой сорбционной способностью, проблема интенсификации не стоит так остро, как при крашении гидрофобных синтетических материалов. Однако, при использовании водорастворимых активных красителей, она остается актуальной [4]. Это связано с необходимостью поиска путей повышения степени ковалентной фиксации красителя на волокне, что позволяет снизить десорбцию красителя при промывке окрашенного материала, а также его поступление в сточные воды.

Таблица 4 – Физико-механические показатели полиэфирной ткани после обработки водными растворами интенсификаторов

Режим обработки образца	Разрывная нагрузка, кН (основа/уток)	Относительное удлинение при разрыве, % (основа/уток)
Не обработанный	0,74/0,64	43/39
Обработка салициловой кислотой:		
без красителя	0,67/0,61	32/30
с красителем желтым прочным 43	0,66/0,60	34/32
с красителем темно-синим	0,67/0,60	33/32
Обработка хлоридом триэтилбензиламмония:		
без красителя	0,69/0,62	41/36
с красителем желтым прочным 43	0,69/0,62	41/35
с красителем темно-синим	0,68/0,61	41/35
Обработанный бромидом триметилцетиламмония:		
без красителя	0,71/0,63	42/30
с красителем желтым прочным 43	0,69/0,62	41/37
с красителем темно-синим	0,69/0,63	41/37

Во второй части экспериментального исследования изучен и разработан процесс интенсифицированного крашения целлюлозной волокнистой составляющей хлопкополиэфирной ткани активными красителями (монохлортриазиновый (МХТ) и винилсульфоновый (ВС)) с использованием в качестве интенсификаторов ЧАС.

Еще один важный аспект оценки эффективности интенсификаторов и разработки технологического процесса – это выбор последовательности введения компонентов красильного раствора. И здесь возможны два варианта [4, 5]:

1. введение в красильный раствор одновременно интенсификатора (четвертичной аммониевой соли) и активного красителя;
2. введение сначала интенсификатора, а затем активного красителя.

Экспериментально установлено, что четвертичная аммониевая соль оказывает интенсифицирующее действие при ее введении в красильный раствор перед красителем. Эта зависимость сохраняется при разных способах окрашивания: периодическом, плюсовочно-проявительном, плюсовочно-роликовом и непрерывном. Для применения разрабатываемой технологии на предприятии бытового обслуживания рекомендуется периодический способ крашения [6].

Последовательное введение компонентов в красильную ванну было учтено при определении степени ковалентной фиксации монохлортриазинового и винилсульфонового красителей на хлопковом волокне и их выбираемости из красильной ванны (см. табл. 5). Общее содержание активного красителя на окрашенном целлюлозном волокне оценивали по его остаточной концентрации в красильной и промывных ваннах. Установлено, что введение в красильную ванну четвертичных аммониевых солей способствует повышению сорбции

активных монохлортриазиновых и винилсульфоновых красителей. Наибольшая степень ковалентной фиксации активных красителей и их выбираемость из красильной ванны соответствует образцу, окрашенному с применением хлорида бензилдиметилцетиламмония, выбираемость активных красителей указанных типов в этом случае достигает 98 %.

Таблица 5 – Степень ковалентной фиксации активных красителей на целлюлозном волокне

Интенсификатор (ЧАС), 1 г/л	Количество активного красителя на волокне, [ммоль/г]	
	МХТ (Reactive blue 13)	BC (Reactive red 35)
Без интенсификатора	18,54	20,47
хлорид бензилтриметилцетиламмония	25,31	28,49
хлорид бензилтриэтиламмония	19,00	21,06
бромид триметилцетиламмония	18,84	20,39
Бромид диметилдодециламмония	24,09	27,69

Путем анализа экспериментальных образцов было установлено, что эти интенсификаторы не только повышают степень использования активных красителей, но и позволяют получить при крашении хлопчатобумажной ткани периодическим способом окраски с высокими колористическими и прочностными характеристиками (см. табл. 6).

Таблица 6 – Колористические и прочностные показатели окрасок хлопчатобумажной пряжи активными красителями, полученных с применением рекомендуемых интенсификаторов

Активные красители	Показатели качества окраски						
	Интенсивность		Координаты цвета			Устойчивость окраски, балл	
	R, %	K/S	ΔL , ед.	A	B	к стирке	к трению
Монохлортриазиновый без ЧАС	31,09	0,76	70,22	3,95	-33,22	5/5/5	5
VzC ₁₆ Cl	16,94	2,04	55,36	2,56	-26,91	5/5/5	5
VzC ₁₂ Br	17,02	2,02	57,21	2,60	-26,98	5/5/5	5
Винилсульфовый без ЧАС	32,47	0,70	71,82	31,16	-19,83	5/5/5	4,5
VzC ₁₆ Cl	12,82	2,96	55,43	42,21	-11,27	5/5/5	5
VzC ₁₂ Br	13,04	2,90	57,12	42,03	-11,75	5/5/5	5

Хлопчатобумажная пряжа часто используется в смеси с синтетическими волокнами для различного ассортимента текстильных изделий. Такие изделия подвергаются химической чистке с использованием органических растворителей (см. табл. 7). При этом волокна достаточно устойчивы к такой обработке, а хромофорная система красителей чувствительна к действию хлорированных углеводородов с возможностью ее деструкции [5]. Установлено, что окраски, полученные с применением рекомендуемых интенсификаторов, меньше изменяют цветовой оттенок окраски при использовании активных красителей. Полученные данные

свидетельствуют о более стабильных цветовых показателях окрасок, сформированных с применением хлорида бензилтриметилцетиламмонии в условиях химической чистки.

Таблица 7 – Цветовые характеристики окрашенных образцов после обработки в условиях химической чистки

Активные красители (воздействие ПХЭ)	dL	da	db	dE
R. Blue13 безЧАС	0,173 light	1,565 red	5,944 yell	6,149
R. Blue 13 сЧАС	-10,824 dark	-2,053 green	-0,135 blue	11,018
R. Red35 безЧАС	-4,712 dark	8,283 red	1,571 yell	9,658
R. Red35 с ЧАС	-10,649 dark	8,974 red	9,984 yell	17,141

Результаты исследований, свидетельствует о близости режимов крашения ПЭ и целлюлозной волокнистых составляющих хлопколавсановой ткани, для каждой из которых рекомендуется интенсификатор в виде четвертичных аммониевых солей. На этой основе были рассмотрены различные методы крашения смесовой ткани и разработана оптимальная технология в виде интенсифицированного низкотемпературного процесса периодического крашения хлопколавсановой ткани с первоочередным окрашиванием полиэфирной волокнистой составляющей, регламент которого представлен на рис. 6.

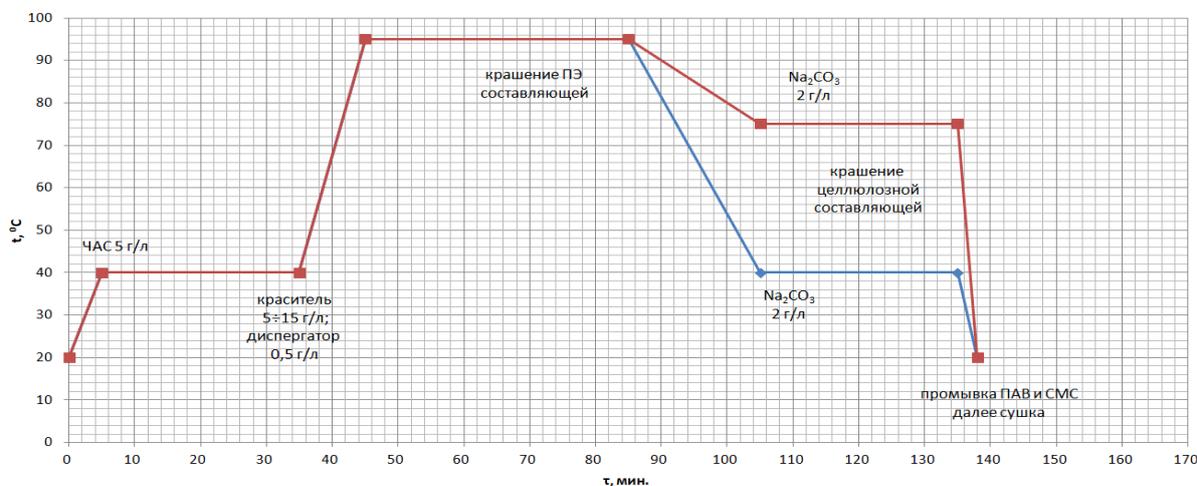


Рисунок 6 – Процесс периодического крашения хлопкополиэфирной ткани с первоочередным окрашиванием полиэфирной волокнистой составляющей

Важно отметить, что помимо высокого качества окрасок (см. табл. 8), применение этой технологии позволяет сохранить физико-механические показатели окрашенной ткани, что обуславливает необходимый уровень эксплуатационных свойств текстильных изделий (см. табл. 9).

Такие результаты обусловлены тем что, щелочные агенты вызывают частичный гидролиз ПЭТФ и используются для модификации полиэфирного волокна с целью улучшения физико-механических свойств. Механизм модификации основан на гидролизе линейных

Таблица 9 – Колористические показатели окрасок хлопка лавсановой ткани, полученных при реализации рекомендуемого интенсифицированного способа крашения

Активный краситель 5 В (акт. Кр. 35) Дисперсный алый ПЭ										
	Ткань однотонная хлопок с ПЭ 50:50					Ткань с накатным рисунком хлопок с ПЭ 50:50				
	R, %	K/S	ΔL , ед.	A	B	R, %	K/S	ΔL , ед.	A	B
Без интен.	90,2	0,01	75,83	32,86	-20,49	45,98	0,317	59,71	45,07	-11,52
VnC ₁₂ Br	79,38	0,02	74,80	29,85	-16,28	38,65	0,48	58,40	43,20	-6,09
VnC ₁₆ Cl	36,56	0,55	63,87	33,35	-0,30	28,92	0,87	54,60	44,04	-1,42
C ₁₆ Br	50,68	0,23	67,77	33,49	-5,36	32,76	0,69	55,04	49,21	-3,96
VnCl	95,63	0,01	80,30	29,20	-24,21	50,58	0,241	62,25	43,39	-12,14

Таблица 10 – Физико-механические показатели ткани, обработанной по разработанной технологии

Вид материала	Разрывная нагрузка, кгс (основа/уток)	Удлинение при разрыве, мм (основа/уток)
Хлопок (не обработанный)	25,8/ 20,5	13,5/11,3
Полиэфир (не обработанный)	72/49	44/32
Периодический способ крашения. Однованный двухстадийный. Крашение в первую очередь х.-б. составляющей		
Хлопок VnC ₁₆ Cl	24,8/19	12/10,5
ПЭ VnC ₁₆ Cl	123,5/91	62,5/48
Хлопок C ₁₆ Br	27,8/23,4	13,5/12
ПЭ VnC ₁₆ Cl	119,2/86,5	54/49,5
Хлопок C ₁₂ Br	27/25,5	14/12
ПЭ C ₁₂ Br	121,5/89,5	56/47
Периодический способ крашения. Однованный двухстадийный. Крашение в первую очередь лавсановую составляющую		
Хлопок VnC ₁₆ Cl	26,6/24,8	14,5/12
ПЭ VnC ₁₆ Cl	117,5/78,5	53/34
Хлопок C ₁₆ Br	28,8/25,5	13/12,2
ПЭ VnC ₁₆ Cl	125/87	70/58
Хлопок C ₁₂ Br	27,4/23	14/11
ПЭ C ₁₂ Br	129,5/93	54,5/41

и циклических олигомеров до мономеров, как на поверхности, так и во внутреннем объеме полимера. Четвертичные аммониевые соли как межфазные катализаторы щелочного гидролиза полиэтилентерефталата ускоряют и регулируют этот процесс. В присутствии ЧАС макромолекулы полиэфирного волокна могут быть легко атакованы анионами щелочного агента за счет того, что катион соли несет анион к поверхности полимера. В результате атаки анионами щелочного агента происходит деполимеризация олигомеров

полиэтилентерефталата, вследствие чего в водную фазу переходят этиленгликоль и динатриевая соль терефталевой кислоты. Таким образом, четвертичные аммониевые соединения оказывают интенсифицирующее влияние на обе волокнистые составляющие смесовой хлопколавсановой ткани в процессе ее крашения дисперсными и активными красителями по периодическому способу.

Заключение

На основании исследования процессов окрашивания полиэфирных и целлюлозных волокон дисперсными и активными красителями с использованием четвертичных аммониевых соединений была установлена их высокая эффективность. Доказана возможность формирования окрасок с улучшенными колористическими и прочностными показателями. Полученные результаты позволили разработать периодический однованный метод интенсифицированного крашения хлопково-лавсановых тканей, модифицированных четвертичными аммониевыми соединениями, с первоочередным окрашиванием полиэфирного компонента. Реализация этого метода обеспечивает возможность окрашивания текстильных изделий на предприятии бытового обслуживания, и обеспечить экологическую безопасность производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забашта, В.Н. Основы интенсификации крашения полиэфирных волокон / В.Н. Забашта. – Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1981. – 136 с.
2. Петухов, Б.В. Полиэфирные волокна / Б.В. Петухов. – Москва: Химия, 1976. – 270 с.
3. Ланге, К.Р. Поверхностноактивные вещества: синтез, свойства, анализ, применение / К. Р. Ланге. – Санкт-Петербург: Профессия, 2007. – 240 с.
4. Кричевский, Г.Е. Химическая технология текстильных материалов: Учеб. в 3-х т. Т. 1. / Г.Е. Кричевский. – Москва: Рос. заочн. ин-т текст. и легкой пром-сти, 2000. – 436 с.
5. Кленкова, Н.И. Структура и реакционная способность целлюлозы / Н.И. Кленкова – Ленинград: Наука, 1976. – 367 с.
6. Чекалин, М.А. Активные красители для натуральных волокон / М.А. Чекалин, В.И. Мур // Химическая пром-сть, 1981. – № 10. – С. 585-588.

REFERENCES

1. Zabashta, V.N. Fundamentals of intensification of dyeing of polyester fibers / V.N. Zabashta. – Leningrad: Publishing house of Leningrad State University, 1981. – 136 p.
2. Petukhov, B.V. Polyester fibers / B.V. Petukhov. – Moscow: Chemistry, 1976. – 270 p.
3. Lange, K.R. Surfactants: synthesis, properties, analysis, application / K.R. Lange. – St. Petersburg: Profession, 2007. – 240 p.
4. Krichevsky, G.E. Chemical technology of textile materials: Textbook. in 3 volumes. Vol. 1. / G.E. Krichevsky. – Moscow: Russian Correspondence Institute text. and light industry, 2000. – 436 p.
5. Klenkova, N.I. Structure and reactivity of cellulose / N.I. Klenkova – Leningrad: Nauka, 1976. – 367 p.
6. Chekalin, M.A. Active dyes for natural fibers / M.A. Chekalin, V.I. Mur // Chemical industry, 1981. – No. 10. – P. 585-588.

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА МАНИПУЛЯТОРА СОРТИМЕНТОВОЗА С ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИМ ДЕМПФЕРОМ

KINEMATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE LIFTING MECHANISM OF THE SORTING TRUCK MANIPULATOR WITH A HYDROMECHANICAL DAMPER

- | | |
|--|--|
| <p>Богданов Д.С., аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия</p> | <p>Bogdanov D.S., postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia</p> |
| <p>Евсиков И.Д., аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия</p> | <p>Evsikov I.D., postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia</p> |
| <p>Попкива А.В., аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия</p> | <p>Popikova A.V., postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia</p> |
| <p>Полумиско А.А., студент магистратуры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия</p> | <p>Polumisko A.A., master's student, Voronezh State University, Voronezh, Russia</p> |
| <p>Попиков С.К., аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия</p> | <p>Popikov S.K., postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia</p> |
| <p>Путятин П.А., студент магистратуры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия</p> | <p>Putyatin P.A., master's student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia</p> |

Аннотация. Для снижения динамических нагрузок в гидроприводе механизма подъема стрелы манипулятора сортиментовоза в процессах погрузочно-разгрузочных работ предлагается подключить дополнительный гидромеханический демпфер. На основании расчетных схем для механизма подъема стрелы и демпфера составлена математическая модель. Получены графики зависимости от времени для угла подъема стрелы, давления в напорном трубопроводе и хода плунжера демпфера.

Ключевые слова: манипулятор, гидропривод, демпфер, механизм подъема стрелы, математическая модель.

Abstract. To reduce dynamic loads in the hydraulic drive of the boom lift mechanism of the timber truck manipulator during loading and unloading operations, it has proposed to connect an additional hydromechanical damper. Based on the calculation schemes for the boom lift mechanism and damper, a mathematical model has compiled. Graphs of the time dependence for the boom lift angle, pressure in the pressure pipeline and the plunger stroke of the damper have obtained.

Keywords: manipulator, hydraulic drive, damper, boom lifting mechanism, mathematical model.

В лесном комплексе при проведении рубок ухода за лесом для вывозки древесины широко применяются сортиментовозы на базе автомобилей, оборудованные гидроманипуляторами (рис. 1) [1]. Для снижения динамических нагрузок предлагается подключить в гидросистему гидромеханический демпфер [2]. Составлены расчетные схемы механизма подъема стрелы (рис. 2) и демпфера (рис. 3).



Рисунок 1 – Сортиментовоз с манипулятором ЛВ-185-14

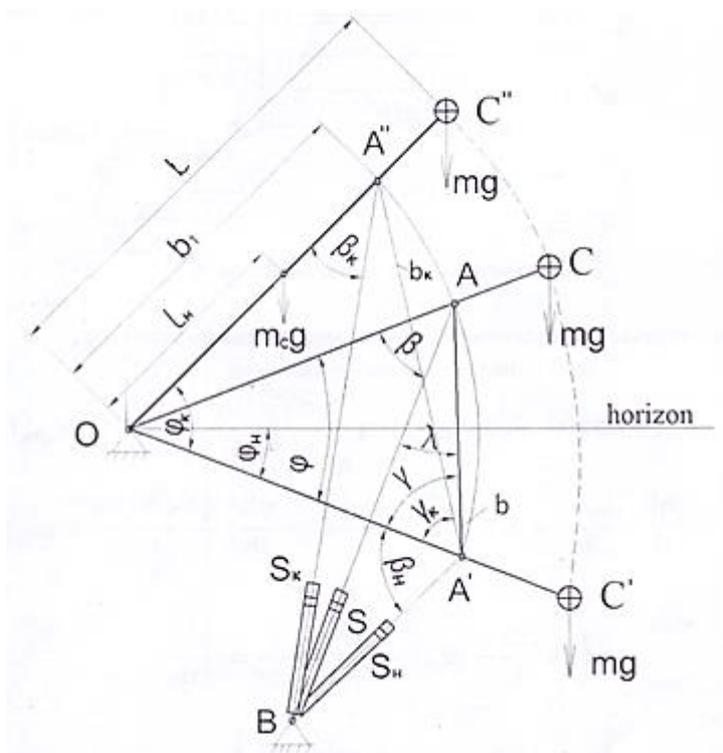


Рисунок 2 – Расчетная схема механизма подъема стрелы манипулятора

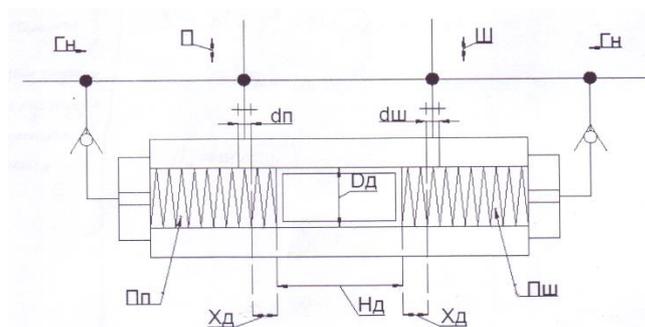


Рисунок 3 – Расчетная схема демпфера

Для исследования кинематических и динамических характеристик разработана математическая модель подъема стрелы манипулятора с дополнительным демпфером, включающая дифференциальные уравнения подъема стрелы, расхода рабочей жидкости и движения плунжера гидромеханического демпфера [3-5]. В математической модели искомыми функциями от времени t являются φ – угол поворота стрелы, p – давление рабочей жидкости и x_d – ход плунжера гидромеханического демпфера.

С применением программы MATLAB получен график изменения угла подъема стрелы φ (рис. 4), из которого видно, что при подъеме стрелы из крайнего нижнего положения до горизонтального в течение 1,8 с угол имеет отрицательное значение, а затем в течение 6 с он изменяется от 0 до 30 градусов, при этом график имеет колебательный характер из-за влияния гидромеханического демпфера.

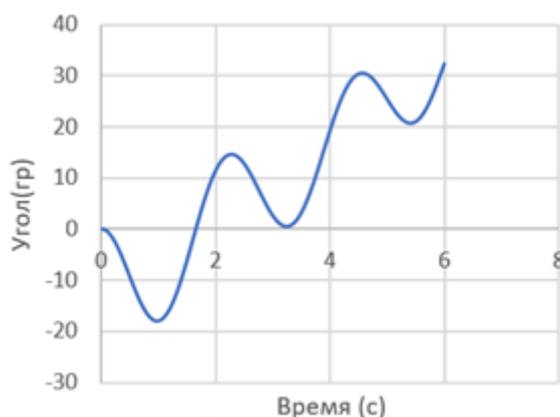


Рисунок 4 – График зависимости угла подъема стрелы φ от времени t

На рис. 5 показан полученный график зависимости давления в напорном трубопроводе p от времени t . Как видно из графика, давление рабочей жидкости достигает максимального значения 20 МПа за 1,5 с.

Получен график зависимости хода плунжера демпфера от времени, представленный на рис. 6. Из графика видно, что перемещение плунжера демпфера на величину 0,05 м происходит за 2 с, что согласуется с графиком зависимости давления, так как обеспечивается гашение всплеска давления при переходных режимах.

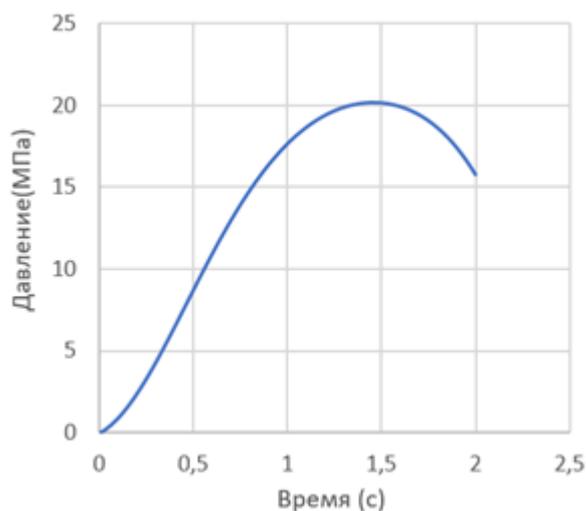


Рисунок 5 – График зависимости давления в напорном трубопроводе p от времени t

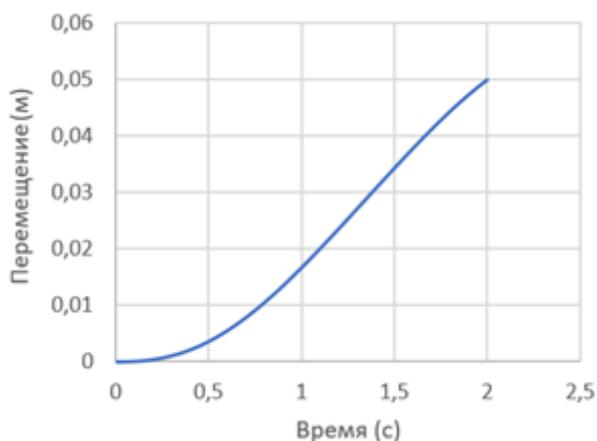


Рисунок 6 – График зависимости хода плунжера демпфера x_d от времени t

В заключение сформулируем основные выводы:

1. Для снижения динамических нагрузок в гидроприводе механизма подъема стрелы манипулятора сортиментовоза в процессах погрузочно-разгрузочных работ предлагается подключить дополнительный гидромеханический демпфер.

2. На основании расчетных схем для механизма подъема стрелы и демпфера составлена математическая модель. Получены графики зависимости от времени функций угла подъема стрелы, давления в напорном трубопроводе и хода плунжера демпфера, которые свидетельствуют о снижении колебаний в системе, что повышает безопасность и надежность выполнения погрузочно-разгрузочных работ в лесном комплексе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование / И.М. Бартенев, З.К. Емтыль, А.П. Татаренко, М.В. Драпалюк, П.И. Попиков, Л.Д. Бухтояров. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "ФЛИНТА", 2011. – 408 с.

2. Патент № 2789167 С1 Российская Федерация, МПК В66С 13/42. Гидропривод грузоподъемного механизма лесного манипулятора : № 2022119768 : заявл. 19.07.2022 : опубли.

30.01.2023 / П.И. Попиков, А.С. Черных, Д.С. Богданов, С.К. Попиков, Е.В. Поздняков, А.В. Попикова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова".

3. Кинематический и динамический анализ механизма подъема манипулятора сортировочного, оснащенного гидромеханическим демпфером, на основе методов Эйлера и Рунге-Кутты / Д.С. Богданов, А.В. Попикова, И.Д. Евсиков, С.К. Попиков, А.А. Полумиско // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 127–143. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/8>.

4. Усков, В.И. Начально-краевая задача для возмущенных дифференциальных уравнений с частными производными третьего порядка // Journal of mathematical sciences (New York). – 2021. – Vol. 255, No. 6. – P. 779-789. – DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10958-021-05415-1>

5. Сидоров, А.А. Моделирование работы гидропривода механизма подъема стрелы лесного манипулятора / А.А. Сидоров, Л.Д. Бухтояров // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 10. – С. 112-115.

REFERENCES

1. Hydraulic manipulators and forestry technological equipment / I.M. Bartenev, Z.K. Emytl, A.P. Tatarenko, M.V. Drapalyuk, P.I. Popikov, L.D. Bukhtoyarov. – Moscow: Limited Liability Company "FLINTA", 2011. – 408 p.

2. Patent No. 2789167 C1 Russian Federation, IPC B66C 13/42. Hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator: No. 2022119768: declared. 19.07.2022; published. 30.01.2023 / P.I. Popikov, A.S. Chernykh, D.S. Bogdanov, S.K. Popikov, E.V. Pozdnyakov, A.V. Popikova; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov".

3. Kinematic and dynamic analysis of the lifting mechanism of a sorting truck manipulator equipped with a hydromechanical damper based on Euler and Runge-Kutta methods / D.S. Bogdanov, A.V. Popikova, I.D. Evsikov, S.K. Popikov, A.A. Polumisko // Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering Journal]. – 2024. – Vol. 14, No. 2 (54). – P. 127–143. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/8>.

4. Uskov, V.I. Initial-boundary value problem for perturbed partial differential equations of the third order // Journal of mathematical sciences (New York). – 2021. – Vol. 255, No. 6. – P. 779-789. – DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10958-021-05415-1>

5. Sidorov, A.A. Modeling the operation of the hydraulic drive of the boom lifting mechanism of a forestry manipulator / A.A. Sidorov, L.D. Bukhtoyarov // Bulletin of KrasSAU. – 2009. – No. 10. – P. 112-115.

**КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ЛЕСНОГО ДИСКОВОГО ПЛУГА
С ГИДРОПРИВОДОМ ЗАДНИХ ВЫРЕЗНЫХ ДИСКОВ ПРИ ПОЛОСНОЙ
ОБРАБОТКЕ ПОЧВЫ НА ВЫРУБКАХ**

KINEMATICS AND DYNAMICS OF FOREST DISK PLOW WITH HYDRAULICALLY
DRIVEN REAR CUTTING DISKS DURING STRIP TILLAGE IN CLEARCUTS

Князев А.Г., аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Драпалюк М.В., доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Попиков П.И., доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Усков В.И., кандидат физико-математических наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Гончаров Д.А., аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Орел Е.М., студент магистратуры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Knyazev A.G., postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Drapalyuk M.V., DrSc in Technical Sciences, Professor, Rector, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Popikov P.I., DrSc in Technical Sciences, Professor, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Uskov V.I., PhD in Physics and Mathematics, Senior Lecturer, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Goncharov D.A., postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Orel E.M., master's student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В работе представлена новая конструктивно-технологическая схема лесного дискового плуга с гидроприводом задних вырезных дисков. Составлена и решена математическая модель рабочего процесса гидропривода дискового рабочего органа при полосной обработке почвы. За счет обоснования параметров гидропривода задних вырезных дисковых рабочих органов можно добиться повышения качественных показателей разделки задернелых пластов лесной почвы от передних дисков плуга.

Ключевые слова: дисковый плуг, гидропривод, вырубki, диск с вырезами, рабочий процесс, математическая модель.

Abstract. The paper presents a new constructive-technological scheme of forest disk plow with hydraulic drive of rear cut-out disks. The mathematical model of the working process of the

hydraulic drive of the disk working body at strip tillage has compiled and solved. By justifying the parameters of the hydraulic drive of the rear cut-out disk working bodies, it is possible to achieve an increase in the quality indicators of cutting of sodden layers of forest soil from the front disks of the plow.

Keywords: disk plow, hydraulic drive, cutting, disk with cutouts, work process, mathematical model.

В лесном хозяйстве существует проблема обработки почвы на нераскорчеванных вырубках. Наиболее перспективными орудиями являются лесные дисковые плуги, однако они не обеспечивают требуемые качественные показатели. Исследованиям рабочего процесса дисковых орудий посвящены многие работы отечественных и зарубежных ученых.

Получены кинематические, динамические характеристики гидропривода для переходных процессов. Исследован процесс взаимодействия вырезных дисковых рабочих органов полосопрокладывателя с почвенной средой. Гидропривод вращательного действия предлагается в работе [1] с гидромотором.

В работе [2] задачей исследования является проведение многофакторного теоретического изучения процессов формирования почвенного потока, его движения в воздухе и воздействия на кромку лесного пожара с использованием созданной модели.

Проблемы недостаточной эффективности лесных почвообрабатывающих орудий поднимаются в работе [3]. Указывается на несовершенство предохранительных устройств рабочих органов, высокую металлоемкость, низкую проходимость и маневренность при работе на вырубках.

В [4] проведено имитационное моделирование работы лесного дискового рыхлителя с использованием средств САПР SolidWorks. Получены кинематические и динамические характеристики при преодолении препятствий. Указаны пути повышения маневренности и проходимости агрегата.

Авторами [5] предлагается блочно-модульная концепция разработки комплекса почвообрабатывающих лесных орудий, суть которой заключается в возможности агрегатирования различных сменных модулей рабочих органов на базовой платформе на передней или задней навеске трактора. Разработаны различные варианты многофункциональных агрегатов, позволяющих выполнять несколько операций за один проход трактора.

Таким образом установлено, что виды лесных плугов, применяемые для обработки почвы на нераскорчеванных вырубках, имеют некоторые недочеты, проявляющиеся в недостаточной заглубляемости дисков и использовании балластного ящика, а также при встрече с препятствиями высокими динамическими нагрузками. Для снижения динамических нагрузок и повышения качественных показателей выявлена тенденция применения в лесном хозяйстве почвообрабатывающих орудий с гидроприводом вырезных дисковых рабочих органов.

На рис. 1 представлена новая конструктивно-технологическая схема лесного дискового плуга с гидроприводом задних вырезных дисков, а на рис. 2 – расчетная схема вырезного диска.

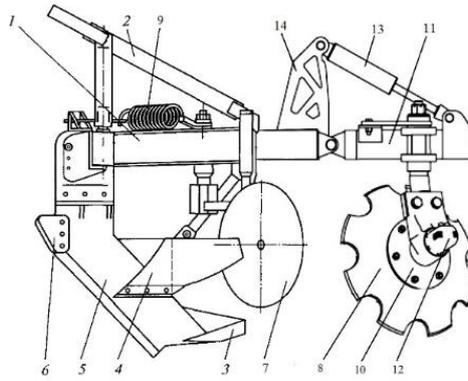


Рисунок 1 – Лесной дисковый плуг: 1 – передняя рама; 2 – навесное устройство; 3 – рыхлительная лапа; 4 – дерносор; 5 – черенковый нож; 6 – лобовик; 7 – передний дисковый корпус; 8 – задний дисковый корпус; 9 – предохранительная пружина; 10 – ступица; 11 – задняя рама; 12 – гидромотор; 13 – гидродогрузатель; 14 – стойка

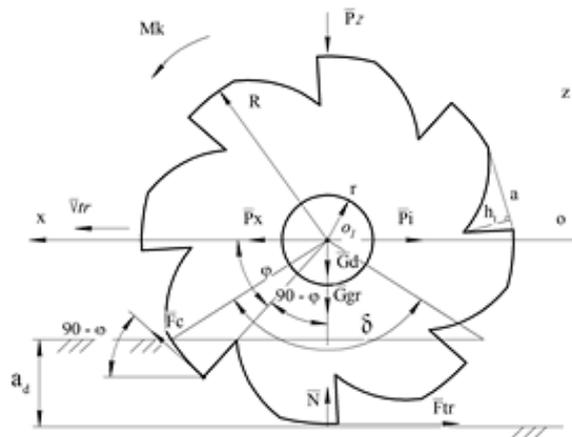


Рисунок 2 – Расчетная схема вырезного диска

Предметом исследования является взаимодействие вырезных сферических дисков с почвой при принудительном вращении от гидромоторов.

Рабочий процесс дисковых рабочих органов лесного дискового плуга описан системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} (M_d + M_{гр}) \frac{d^2x}{dt^2} &= P_x - \left\{ G_d + G_{гр} + P_z - 0,5k_{уд} \cdot \left[R^2 \left(\frac{\pi\delta^\circ}{180^\circ} - \sin \delta^\circ \right) - 2,5h_t \frac{a}{2} \right] \cdot \sin \alpha \cdot \sin(90 - \varphi) \right\} f + \\ &\quad + 0,5k_{уд} \cdot \left[R^2 \left(\frac{\pi\delta^\circ}{180^\circ} - \sin \delta^\circ \right) - 2,5h_t \frac{a}{2} \right] \cdot \sin \alpha \cdot \sin(90 - \varphi); \\ I_{пр} \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= \frac{q_m}{2\pi} \cdot p - \left\{ G_d + G_{гр} + P_z - 0,5k_{уд} \cdot \left[R^2 \left(\frac{\pi\delta^\circ}{180^\circ} - \sin \delta^\circ \right) - 2,5h_t \frac{a}{2} \right] \cdot \sin \alpha \cdot \sin(90 - \varphi) \right\} Rf - \\ &\quad - 0,5k_{уд} \cdot \left[R^2 \left(\frac{\pi\delta^\circ}{180^\circ} - \sin \delta^\circ \right) - 2,5h_t \frac{a}{2} \right] \cdot R \sin \alpha; \\ q_n n_n &= \frac{q_m}{\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + a_y \cdot p + K_p \cdot \frac{dp}{dt} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где G_d и $G_{гр}$ – силы тяжести диска и почвы на диске, Н; M_d и $M_{гр}$ – массы диска и почвы на диске, кг; f – коэффициент трения скольжения почвы по стали; r – радиус ступицы, м; h_t – глубина выреза, м; R – радиус диска, м; t – время, с; α – угол атаки, рад; $I_{пр}$ – приведенный к валу гидромотора момент инерции, кг·м²; φ – угол поворота вала диска, рад; δ – угол

заглубления диска в почву; a – длина выреза, м; q_n и q_m – рабочие объемы насоса и гидромотора, м³/об; a_Y – коэффициент утечек, м³/(с·Па); K_P – коэффициент податливости упругих элементов гидропривода, м⁵/(Н·с); p – давление рабочей жидкости, Па; n_n – частота вращения насоса, с⁻¹.

При решении системы дифференциальных уравнений (1) рассматривается задача Коши на интервале $t \in (t_0; t_{end})$:

$$\begin{aligned} x(t_0) &= x^0, \quad x'(t_0) = x^1, \\ \varphi(t_0) &= \varphi^0, \quad \varphi'(t_0) = \varphi^1, \\ p(t_0) &= p^0, \\ \frac{d^2x}{dt^2} &\approx \frac{x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i}{h^2}, \\ \frac{d\varphi}{dt} &\approx \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{h}, \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} \approx \frac{\varphi_{i+2} - 2\varphi_{i+1} + \varphi_i}{h^2}, \\ \frac{dp}{dt} &\approx \frac{p_{i+1} - p_i}{h}. \end{aligned} \quad (2)$$

В результате решений дифференциальных уравнений в математической модели лесного дискового плуга получены осциллограммы, предсказывающие поведение при работе моделирующего движение вырезного сферического диска с гидроприводом.

Решение системы дифференциальных уравнений рабочего процесса лесного дискового плуга проводилось при помощи языка программирования Python с использованием библиотек Scipy, Numpy, Matplotlib. Получены осциллограммы зависимостей от времени перемещения диска (рис. 3), вращения диска (рис. 4) и давления рабочей жидкости в гидросистеме (рис. 5).

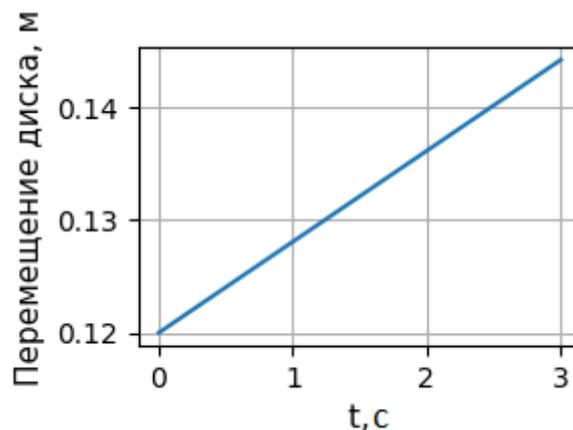


Рисунок 3 – Осциллограмма перемещения диска

Зависимость перемещения диска от времени имеет линейный характер, что говорит о равномерном движении диска вдоль оси x (рис. 3). Такая тенденция сохраняется при изменении входных данных.

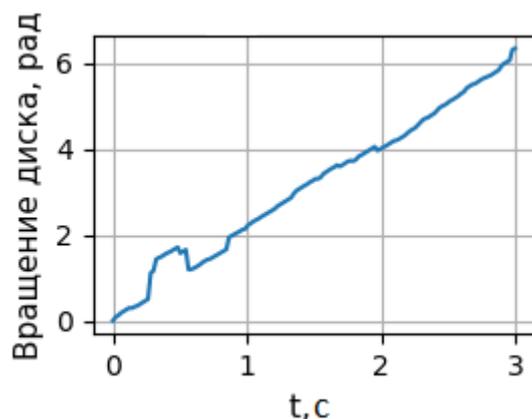


Рисунок 4 – Оциллограмма вращения диска

Анализ зависимости вращения вырезного сферического диска от времени показывает незначительное ускорение (рис. 4), но в основном при изменении исходных данных скорость вращения постоянна.

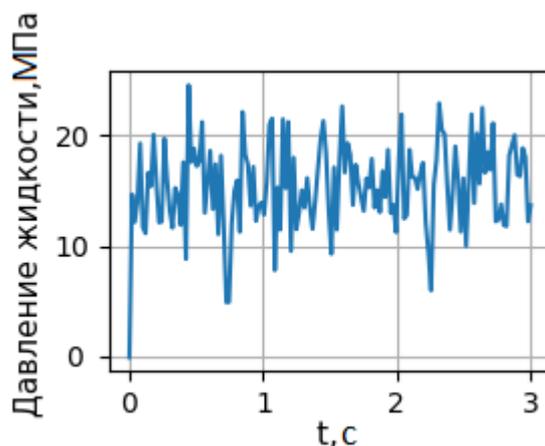


Рисунок 4 – Оциллограмма изменения давления в гидросистеме

Анализ зависимостей значений давления рабочей жидкости в гидроприводе диска от угла атаки показал, что оптимальный диапазон углов атаки составляет 25° - 35° , при этом происходит снижение максимальных динамических нагрузок в 1,3 раза и повышение качества обработки почвы до уровня 70-80%.

Таким образом, в работе показано, что за счет обоснования параметров гидропривода задних вырезных дисковых рабочих органов можно добиться повышения качественных показателей разделки задернелых пластов лесной почвы от передних дисков плуга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование процесса взаимодействия лесного дискового плуга с почвой при создании противопожарных полос / П.И. Попиков, Д.Ю. Дручинин, В.Н. Коротких, С.В. Зимарин, Н.А. Шерстюков, Д.С. Ступников // Resources and Technology. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 17-31.

2. Князев, А.Г. Системный подход к сравнительному анализу плугов для обработки почв при лесовосстановлении / А.Г. Князев, Н.С. Камалова, Р.В. Юдин // Воронежский научно-технический Вестник. – 2020. – Т. 4, № 4(34). – С. 23-29.

3. Основные причины недостаточной эффективности лесных почвообрабатывающих агрегатов и пути ее повышения / В.И. Посметьев, В.А. Зеликов, М.А. Латышева, В.В. Посметьев // Воронежский научно-технический Вестник. – 2015. – Т. 4, № 3-3(13). – С. 45-59.

4. Лысыч, М.Н. Исследование рабочего процесса лесного дискового рыхлителя с использованием средств САПР / М.Н. Лысыч, М.Л. Шабанов, Р.В. Иконников // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 12-2. – С. 263-268.

5. Бартнев, И.М. Общая концепция блочно-модульного построения лесных почвообрабатывающих орудий / И.М. Бартнев, М.Н. Лысыч // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 2. – С. 18-26.

REFERENCES

1. Modeling the interaction process of a forest disc plow with soil when creating firebreaks / P.I. Popikov, D.Yu. Druchinin, V.N. Korotkikh, S.V. Zimarin, N.A. Sherstyukov, D.S. Stupnikov // Resources and Technology. – 2017. – Vol. 14, No. 4. – P. 17-31.

2. Knyazev, A.G. A systems approach to a comparative analysis of plows for soil cultivation during reforestation / A.G. Knyazev, N.S. Kamalova, R.V. Yudin // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2020. – Vol. 4, No. 4 (34). – P. 23-29.

3. The main reasons for the insufficient efficiency of forest soil-cultivating units and ways to improve it / V.I. Posmetyev, V.A. Zelikov, M.A. Latysheva, V.V. Posmetyev // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2015. – Vol. 4, No. 3-3 (13). – P. 45-59.

4. Lysych, M.N. Study of the working process of a forest disk ripper using CAD tools / M.N. Lysych, M.L. Shabanov, R.V. Ikonnikov // Modern science-intensive technologies. – 2016. – No. 12-2. – P. 263-268.

5. Bartnev, I.M. General concept of block-modular construction of forest tillage implements / I.M. Bartnev, M.N. Lysych // Tractors and agricultural machinery. – 2019. – No. 2. – P. 18-26.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БЕСЧОКЕРНОГО ЗАХВАТА
С ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМ ГИДРОПРИВОДОМ**
SIMULATION OF THE OPERATION OF A SHOCKLESS GRIPPER
WITH AN ENERGY-SAVING HYDRAULIC DRIVE

Дерепаско И.В., соискатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Четверикова И.В., кандидат технических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Красникова А.Ю., студент магистратуры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Derepasko I.V., postgraduate applicant, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

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

Krasnikova A.Yu., master's student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В Российской Федерации остаётся актуальным вопрос механизация предприятий лесной промышленности. Для повышения энергосберегающих свойств техники все чаще применяются устройства рекуперации энергии. Применение рекуперативных схем для бесчокерных трелевочных тракторов и подвесных трелевочных агрегатов позволит снизить энергетические потери от колебаний пачки брёвен, а также снизить нагрузку на механизм. В статье представлен анализ существующих исследований по применению гидравлических схем с реализованной системой энергосбережения. Предложен вариант компоновки гидравлической системы навесного трелевочного агрегата, позволяющий демпфировать вертикальные нагрузки.

Ключевые слова: бесчокерная трелёвка, рекуперативная система, гидравлическая система, гидроаккумулятор.

Abstract. In the Russian Federation, the issue of mechanization of forest industry enterprises remains relevant. In order to improve the energy-saving properties of equipment, energy recovery devices are increasingly being used. The use of recuperative schemes for non-choker logging tractors and hanging logging units will reduce energy losses from the oscillations of the log bundle, as well as decrease the load on the mechanism. This article presents an analysis of existing research on the application of hydraulic schemes with an implemented energy-saving system. A proposed layout variant of the hydraulic system for a hanging logging unit has presented allowing for the damping of vertical loads.

Keywords: non-choker logging, recuperative system, hydraulic system, hydro-accumulator.

В настоящее время на предприятиях лесной промышленности Российской Федерации активно решается вопрос о механизации всех видов труда. Для недопущения повышения затрат предприятий задачей исследований ставится рассмотрение энергосберегающих механизмов. Внедрение перспективных ресурсосберегающих механизмов может повлечь за собой повышение объемов не сплошных рубок, уменьшение затрат производства, увеличение экологической совместимости техники с природой.

Наиболее производительным с точки зрения объемов производимой работы является применение больших лесозаготовительных машин, например, харвестеров или форвардеров. Однако высокая стоимость не позволяет применять их в больших объемах и на малых предприятиях. Поэтому более распространенным вариантом на текущий момент является применение лесохозяйственных машин и оборудования, которые агрегируются, в основном, с колёсными тракторами общего назначения, что значительно сокращает стоимость.

Самым выгодным вариантом транспортной операции является трелёвка древесины. Так как трелёвочные средства перемещаются по обширной территории и работают на одной лесосеке в течение короткого времени, капитальные затраты на устройство пути не делаются [1]. Трелёвка производится в исключительно трудных условиях – при полном бездорожье, на любых грунтах летом или по заснеженной целине зимой, с преодолением многочисленных препятствий в виде пней, валежника, валунов и т.д.

Применяемые в настоящее время трелёвочные тракторы бывают трех типов [2]: с тросочерным оборудованием; с гидроманипуляторами с клещевыми захватами и кониковыми зажимными устройствами; с крупногабаритными клещевыми захватами. Преимуществом трелёвочных тракторов с тросочерным оборудованием перед тракторами, оснащенными манипуляторами или клещевыми захватами, является лучшая проходимость на трудных участках. К достоинствам технологического оборудования, состоящего из манипулятора с клещевым захватом и коникового зажимного устройства, относится возможность подбора отдельных деревьев на лесосеке и регулирования объема пачки, полное отсутствие ручного труда.

На данный момент почти все машины, применяемые в лесном хозяйстве, оснащены гидравлическим оборудованием, поэтому повышение эксплуатационных характеристик гидравлического оборудования и гидропривода в целом позволит повысить эффективность и производительность лесных машин [3].

Однако гидропривод трелёвочных захватов и гидросистемы тракторов не полностью удовлетворяют требованиям эксплуатации в лесных условиях. В процессе трелёвки происходят утечки и перетечки рабочей жидкости, в результате чего уменьшаются силы прижатия сортиментов в захвате и происходят потери отдельных хлыстов или сортиментов, что влияет на производительность машины [4]. Кроме того, наблюдаются большие вертикальные и горизонтальные колебания трелюемых пачек, это вызывает большие динамические нагрузки в гидроприводе и потери мощности трактора. Поэтому при проектировании для решения этих проблем необходимо применять энергосберегающий гидропривод. Широкий спектр возможностей исследований данного вопроса предоставляет использование ЭВМ.

В современной лесной промышленности существуют большое количество различного оборудования и машин для трелевки пачек древесины: трелевочное оборудование ПТН-0,8 «Муравей»; Приспособление трелевочное навесное ПТН 30; Трелевочная машина К-703М-МЛ-56; Трелевщик бесчокерный «Краб»; Тракторы ЛТ-157 и МЛ-30. Наиболее распространенные из них представлены на рис. 1 [5].

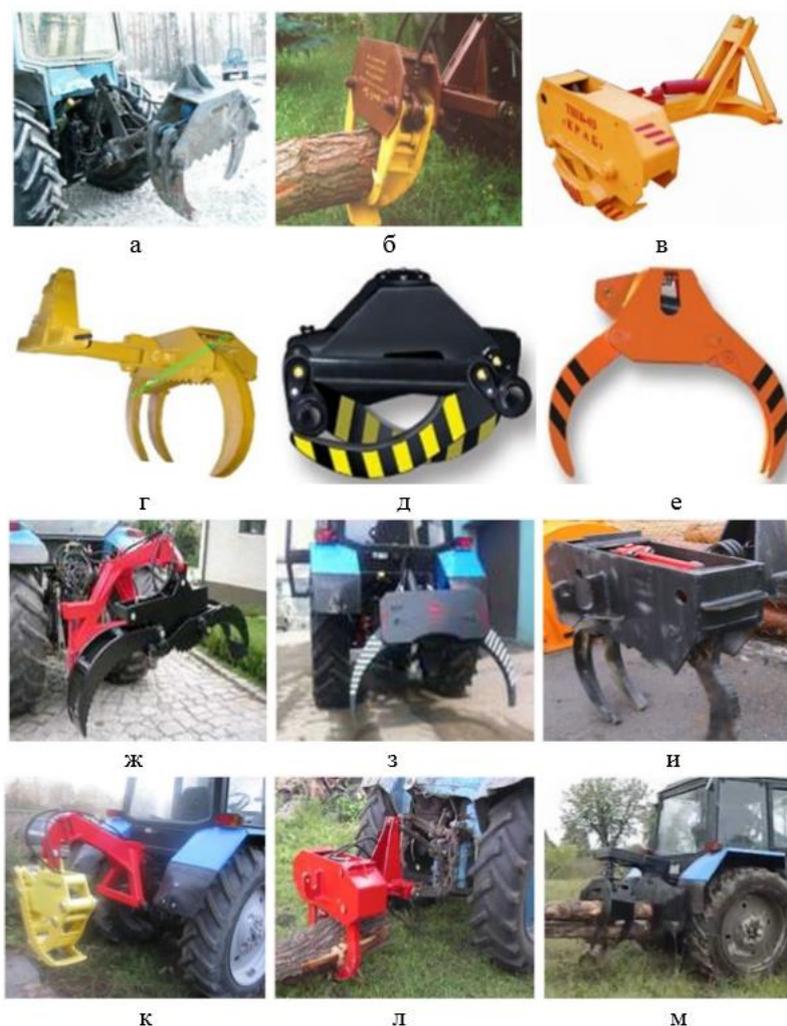


Рисунок 1 – а – «Муравей»; б – УТ-1 «Паук»; в – ТШБ-03 «Краб»; г – ПТН-0,8; д – грейфер ВЕЛМАШ-С 70.48; е – грейфер ВЕЛМАШ-С Р-20; ж – ONIAR; з – УТ-800; и – ПТБ-4,5У4; к – «Горыныч»; л – ПТБ-4,5М; м – ПТБ-4,5У-М

Общим их конструктивным недостатком является то, что при трелевке пачки захват находится в транспортном положении, и при движении трактора по неровностям вырубке возникают значительные по величине вертикальные и горизонтальные колебания пачки бревен. Это приводит к большим динамическим нагрузкам и поломкам элементов металлоконструкции и гидропривода трелевочного оборудования или навесного механизма трактора. При этом отсутствует возможность рекуперации энергии от перемещений пачки хлыстов в вертикальной и горизонтальной плоскостях относительно трактора, чем снижается экономичность агрегата при трелевке леса.

Одним из вариантов снижения динамических нагрузок и энергозатрат является применение энергосберегающего (рекуперативного) гидропривода с гидроаккумулятором. В настоящее время рекуперативный гидропривод с аккумулятором применяется в машинах циклического действия манипуляторах, автокранах, экскаваторах, но в лесной промышленности это не распространено.

Рассмотрим кинематическую схему бесчокерного захвата трелевочного ПТН-0,8 в агрегате с трактором МТЗ-82, представленную на рис. 2.

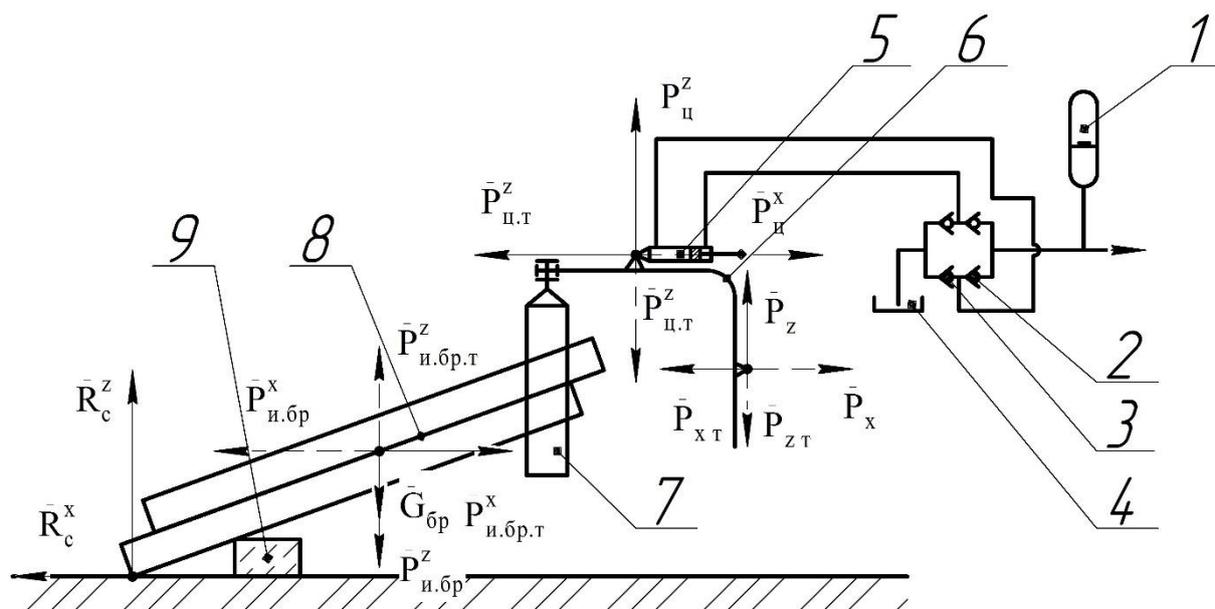


Рисунок 2 – Расчетная схема бесчокерного захвата с энергосберегающим гидроприводом

Рассмотрим рабочие процессы захвата вместе с пачкой при переходных режимах разгона и торможения, которые можно описать уравнением движения поршня гидроцилиндра рекуперации и уравнением расхода рабочей жидкости гидроцилиндра рекуперации с учетом перетечек в гидроаккумулятор при давлении выше предварительной зарядки.

Ниже представлена нелинейная система дифференциальных уравнений движения захвата с пачкой бревен [3]:

$$m_{\delta p} \frac{d^2x}{dt^2} = pS + P_x - R_c^x, \quad (1)$$

$$S \frac{dx}{dt} = k\sqrt{|p - p_0|} + \frac{V_0}{E_{np}} \cdot \frac{dp}{dt}, \quad (2)$$

$$x(0) = x_0, \quad x'(0) = x_1, \quad p(0) = p_0, \quad (3)$$

- где $m_{\delta p}$ – масса пачки бревен в захвате, кг;
 S – рабочая площадь поршня гидроцилиндра рекуперации энергии, м²;
 p – давление жидкости в гидроприводе, Па;
 P_x – горизонтальная составляющая силы тяги, Н;
 R_c^x – горизонтальная составляющая силы сопротивления волочению пакета бревен, Н;

k – коэффициент дросселирования рабочей жидкости в гидролинии между гидроцилиндром рекуперации и гидроаккумулятором, $\text{м}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}^{-1/2}$

p_0 – давление предварительной зарядки гидроаккумулятора, Па;

V_0 – рабочий объем гидроаккумулятора, м^3 ;

$E_{\text{пр}}$ – приведенный модуль упругости, Па.

Решение данной системы уравнений представлено в виде разработанного алгоритма формул (4) - (7) в среде MatchCad, причем программа закладывает цикл, проводящий итерационный процесс в порядке, представленном ниже. Алгоритм расчета:

$$p_1 = \frac{\alpha}{\beta} \cdot (x_1 - x_0) + p_0. \quad (4)$$

$$x_1 = x_0 + h \cdot \frac{V_0}{E_{\text{пр}} \cdot S} \cdot p_0. \quad (5)$$

$$x_i = x_0 + (x_1 - x_0) \cdot i + \frac{h^2}{m_{\delta p}} \cdot \sum_{j=0}^{i-2} (i - j - 1) \cdot (\alpha \cdot p_j - F_c) \quad (6)$$

$$x_i = x_0 + (x_1 - x_0) \cdot i + \frac{h^2}{m_{\delta p}} \cdot \sum_{j=0}^{i-2} (i - j - 1) \cdot (\alpha \cdot p_j - F_c) \quad (7)$$

Исходные данные:

$m_{\delta p} = 500$ кг – масса пачки бревен в захвате, кг;

$D = 0,0064$ м – диаметр рабочей площади поршня гидроцилиндра рекуперации энергии, м^2 ;

$D_{\text{ак}} = 0,012$ м – внутренний диаметр штуцера гидроаккумулятора, м;

p – давление жидкости в гидроприводе, Па;

$R_x = 0$ – горизонтальная составляющая силы тяги, Н;

$R_c^x = 0$ – горизонтальная составляющая силы сопротивления волочению пакета бревен,

Н;

$p_0 = 5$ мПа – давление предварительной зарядки гидроаккумулятора, Па;

$V_0 = 0,0035$ – рабочий объем гидроаккумулятора, м^3 ;

$E_{\text{пр}} = 105000000$ – приведенный модуль упругости, Па.

Таким образом, решение задачи (1), (2), (3) записывается в виде совокупности значений $x_i = x(t_i)$, $p_i = p(t_i)$ на отрезке $(0; t_{\text{max}})$, в точках $t_i = 0 + i \cdot h$ с шагом $h = \frac{t_{\text{max}} - 0}{n} = \frac{t_{\text{max}}}{n}$, где x_i определяются формулой (6), а p_i определяются из итерационного процесса (7), где x_0, x_1, p_0 – начальные значения. Результаты программного расчета представлены на рисунках 3-5.

Таким образом, на основании программного расчета становится возможным оценить среднюю мощность рекуперации, которая определяется по формуле

$$N_{\text{Pcp}} = \frac{1}{t_{\text{кэ}}} \int_0^{t_{\text{кэ}}} N_P(t) dt = \frac{dP}{t_{\text{кэ}}} \int_0^{t_{\text{кэ}}} \left(\frac{dx}{dt}(t) - v_a \right)^2 dt, \quad (8)$$

	P	X
	0	1
0	$5 \cdot 10^6$	0
1	$5.025 \cdot 10^6$	0.026
2	$5.151 \cdot 10^6$	0.052
3	$5.422 \cdot 10^6$	0.078
4	$5.861 \cdot 10^6$	0.104
A = 5	$6.476 \cdot 10^6$	0.13
6	$7.274 \cdot 10^6$	0.156
7	$8.259 \cdot 10^6$	0.182
8	$9.432 \cdot 10^6$	0.207
9	$1.08 \cdot 10^7$	0.233
10	$1.235 \cdot 10^7$	0.259
11	0	[12, 2]

Рисунок 3 – Полученные значения для давления и координаты на отрезке времени $t = 0 \dots 0,05$ с

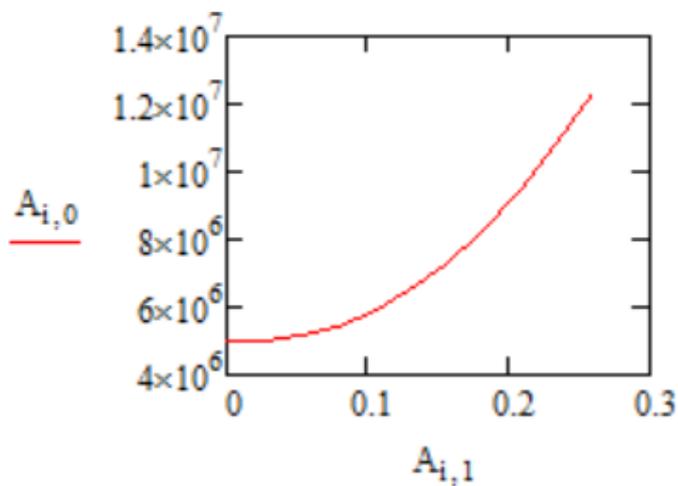


Рисунок 4 – График функции $p_i = p(t_i)$ (кривая Эйлера)

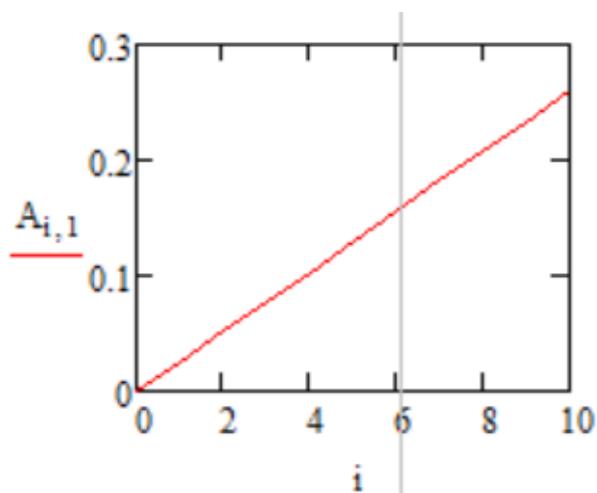


Рисунок 5 – График функции $x_i = x(t_i)$

На основании программного расчета математической модели было получено, что рекуперативная система устройства бесчokerной трелевки леса, представленная на расчётной схеме, обеспечивает снижение энергозатрат тракторного агрегата за счет аккумуляирования непроизводительно теряемой при его работе части энергии от вертикальных и горизонтальных перемещений трелеваемой пачки деревьев. Кроме этого, вследствие существенного снижения максимальных «пиковых» значений давлений в гидроприводе [6] за счет использования в нем гидроаккумулятора соответственно снижаются нагрузки на элементы конструкции навесного механизма и трактора и, тем самым, повышается их надежность. Накопленная энергия в гидроаккумуляторе может использоваться на нужды гидропривода, что позволит сохранить ресурс двигателя и повысить его энергоэффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пошарников, Ф.В. Технология и техника в лесной промышленности : рек. УМО по образованию в обл. лесн. дела в качестве учеб. пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломир. специалистов 260300 (656300) Технология лесозаготов. и деревообаб. пр-в для специальности 250401 (260100) Лесоинженерное дело. Ч. 1 : Лесосечные и лесоскладские работы / Ф.В. Пошарников ; Фед. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования "Воронеж. гос. лесотехн. акад.". – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Воронеж, 2009. – 383 с.

2. Лесозаготовительная техника. – URL: <https://dolina-sdm.ru/information/833/> (дата обращения 10.04.2024 г.).

3. Математическая модель рабочих процессов бесчokerного трелевочного захвата с энергосберегающим гидроприводом / Р.В. Юдин, П.И. Попиков, В.И. Усков, А.А. Платонов, В.П. Попиков, Д.А. Канищев // Resources and Technology. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 72-86.

4. Попиков, П.И. Исследование кинематических и динамических параметров трелевочного устройства с энергосберегающим гидроприводом / П.И. Попиков, Д.А. Канищев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. – Воронеж, 2015. – № 9, ч. 3 (20-3). – С. 141-147.

5. Обоснование выбора схемы и моделирование устройства для бесчokerной трелевки леса с энергосберегающим гидроприводом / П.И. Попиков, В.И. Посметев, А.С. Черных, Д.А. Канищев, В.В. Посметев // Лесотехнический журнал. – 2016. – Т. 6, № 4 (24). – С. 216-224.

6. Четверикова, И.В. К вопросу совершенствования гидропривода бесчokerного трелевочного захвата / И.В. Четверикова, С.В. Зимарин, А.В. Бурдыкин // Повышение эффективности лесного комплекса : материалы седьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием / науч. ред. В.М. Костюлевич ; Петрозаводский государственный университет. – Петрозаводск : ПетрГУ, 2021. – С. 197-199.

REFERENCES

1. Posharnikov, F.V. Technology and equipment in the forestry industry: rec. UMO on education in the regional forestry department as a teaching aid for university students studying in the direction of training graduate specialists 260300 (656300) Technology of logging. and woodworking. production for the specialty 250401 (260100) Forest engineering. Part 1: Logging and timber storage

operations / F.V. Posharnikov; Federal Education Agency, State Educational Institution of Higher Professional Education "Voronezh State Forest Engineering Academy". – 2nd ed., revised. and enlarged. – Voronezh, 2009. – 383 p.

2. Logging equipment. – URL: <https://dolina-sdm.ru/information/833/> (date of access 10.04.2024).

3. Mathematical model of working processes of a chokerless skidding grapple with an energy-saving hydraulic drive / R.V. Yudin, P.I. Popikov, V.I. Uskov, A.A. Platonov, V.P. Popikov, D.A. Kanishchev // Resources and Technology. – 2022. – Vol. 19, No. 1. – P. 72-86.

4. Popikov, P.I. Study of kinematic and dynamic parameters of a skidding device with an energy-saving hydraulic drive / P.I. Popikov, D.A. Kanishchev // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice: collection of scientific papers based on the materials of the international correspondence scientific and practical conference. – Voronezh, 2015. – No. 9, part 3 (20-3). – P. 141-147.

5. Justification of the choice of the scheme and modeling of the device for chokerless timber skidding with an energy-saving hydraulic drive / P.I. Popikov, V.I. Posmetev, A.S. Chernykh, D.A. Kanishchev, V.V. Posmetev // Forestry engineering journal. – 2016. – Vol. 6, No. 4 (24). – P. 216-224.

6. Chetverikova, I.V. On the issue of improving the hydraulic drive of a chokerless skidding grapple / I.V. Chetverikova, S.V. Zimarin, A.V. Burdykin // Improving the efficiency of the forest complex: materials of the seventh All-Russian national scientific and practical conference with international participation / scientific ed. V.M. Kostyulevich; Petrozavodsk State University. – Petrozavodsk: PetrSU, 2021. – P. 197-199.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ВЫПОЛНЕНИЯ
ПОДВЕСОК ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИМИ
УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF DESIGN SCHEMES FOR VEHICLE SUSPENSIONS
WITH PNEUMOHYDRAULIC ELASTIC ELEMENTS**

Нагайцев В.М., студент магистратуры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Терехина И.В., студент магистратуры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Nagaytsev V.M., master's student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Terekhina I.V., master's student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

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

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

Аннотация. В статье на основании обзора существующих конструктивных схем выполнения подвесок транспортных средств с пневмогидравлическими элементами методом многокритериального сравнения альтернатив проводится сравнительный анализ по таким критериям, как срок эксплуатации конструкции в условиях Российской Федерации, плавность хода автомобиля и прочность материалов элементов конструкции. В рамках такого подхода выяснилось, что оптимальной является конструктивная схема подвески типа «независимой двухрычажной поперечной с активным гидроприводом на оси автомобиля».

Ключевые слова: системный анализ, многокритериальный метод сравнения, конструктивная схема, управляемые гидропневматические системы.

Abstract. In the article, based on a review of existing design schemes for the implementation of vehicle suspensions with pneumohydraulic elements, a comparative analysis is carried out using the method of multi-criteria comparison of alternatives according to such criteria as the service life of the structure in the conditions of the Russian Federation, the smoothness of the vehicle and the strength of the materials of the structural elements. Within the framework of this approach, it turned out that the optimal design of the suspension is "an independent double wishbone transverse with an active hydraulic drive on the vehicle axle".

Keywords: system analysis, multi-criteria comparison method, design diagram, controlled hydropneumatic systems.

Производители автомобильной техники для грузового транспорта в условиях рыночной конкуренции вынуждены решать проблему повышения эффективности выпускаемой продукции. Разработка более эффективных конструктивных схем ведется с целью улучшения маневренности, динамических качеств и скоростных характеристик автомобиля, снижения расхода топлива и повышения безопасности управления. Все эти требования могут быть достигнуты путем совершенствования подвесок грузовых автомобилей [1], поскольку подвеска автомобиля играет ключевую роль в комфорте и управляемости транспортного средства. В последнее время ведутся работы по совершенствованию управляемых электронно-компонентной базой подвесок с регулировкой уровня горизонта платформы, которые обеспечивают устойчивое положение платформы независимо от изменения качества дорожного покрытия. Для успешного выполнения этой функции конструкции подвески должны содержать средства контроля клиренса, упругие демпфирующие элементы, характеристики которых (например, жесткость) могли бы меняться непосредственно во время движения в зависимости от состояния дороги. При этом конструкция подвески должна удовлетворять достаточно высоким требованиям к надёжности, долговечности, безотказности, износостойкости. Поэтому обычно в качестве критерия сравнения различных конструктивных схем рассматривается и ремонтпригодность, и удобство обслуживания в условиях Российской Федерации [2].

Для выбора оптимальной конструктивной схемы подвески необходимо рассмотреть существующие технические решения, используя многокритериальные методы сравнения. Такой подход позволит решить проблему с учетом ее комплексности. Необходимо понимать, что выбор не является задачей с однозначным решением, поскольку рассматривается производителями и пользователями с принципиально разных аспектов. Такую проблему можно решать только в рамках системного подхода [3].

Цель данной работы – продемонстрировать возможности применения методов многокритериального анализа при выборе оптимального варианта в рамках системного подхода на примере сравнительного анализа наиболее популярных конструктивных схем подвесок грузовых автомобилей.

На первом этапе комплексных методов поддержки систем принятия решения необходимо определиться с возможными вариантами конструктивных схем подвесок. На настоящий момент считается, что наиболее эффективны подвески с гидропневматическими элементами. По сравнению с другими конструкторскими решениями они отличаются более точным отслеживанием горизонтального положения кузова по отношению к уровню дорожного покрытия.

Одна из перспективных конструкций – регулируемая полуактивная гидропневматическая подвеска (см. рис. 1). Ее основными элементами являются: источник газа (1); реверсивный (2) и обратные (4) и (8) клапаны; контроллер (3); воздушные аккумуляторы (5) и (9); датчики давления (6) и (22); вакуумный насос (7); сервоклапан (10); энергоаккумуляторы (11) и (21); пневмоклапаны (11), (12) и (13); дроссельная заслонка (14);

цилиндры подвески (15), (16); колесо (17); бак (18); кузов (19); датчик ускорения (20) (см. рис. 1а). Данное изобретение создано для адаптации автомобилей к различным условиям дороги и обеспечения плавного и комфортного движения. Система считается привлекательным выбором как для производителей, так и для владельцев транспортных средств. Жесткость подвески меняется полуавтоматически. Отличается сложностью изготовления, настройки и обслуживания [4].

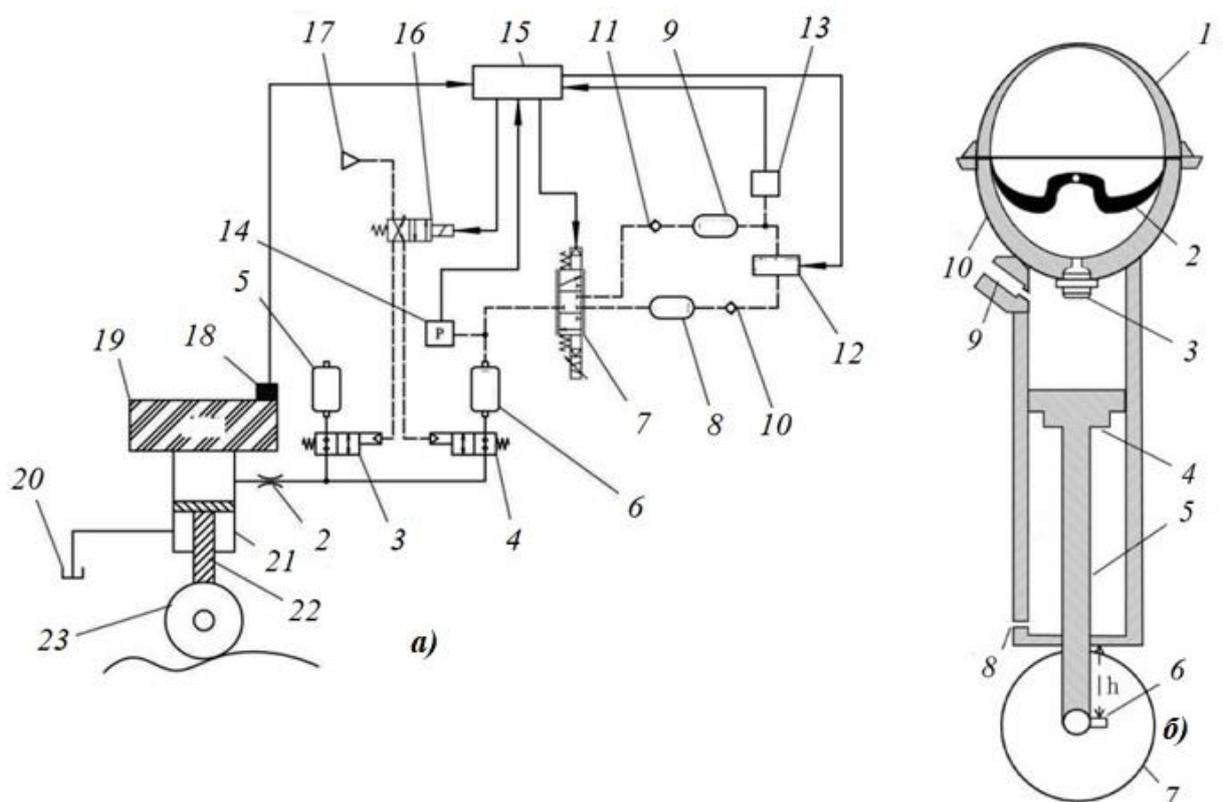


Рисунок 1 – Регулируемая полуактивная гидропневматическая подвеска:
 а) по патенту CN110077192A [4]; б) по патенту CN113212094A [5]

В патенте CN113212094A [5] рассмотрена конструктивная схема, содержащая: верхнюю и нижнюю полусферы (1) и (10); газомасляную диафрагму (2); демпфирующий клапан (3); поршень (4); шток (5); датчик перемещения (6); колесо (7); дренажный канал (8); гидромаслопровод (9) (см. рис. 1б). Использование гидравлических и электромагнитных компонентов позволяет достаточно точно корректировать положение автомобиля. Важно отметить, что при этом обеспечивается не только начальное выравнивание транспортного средства, но и компенсируются любые изменения веса или нагрузки непосредственно в процессе движения. При использовании такой конструкции значительно повышается управляемость и безопасность автомобилей с масляно-газовой подвеской за счет устойчивого положения шасси в любых условиях, появляется возможность регулировки жёсткости подвески, выбора оптимального режима езды в зависимости от дорожных условий. К недостаткам данной конструкции обычно относят: перегрев гидропневматической системы из-за сбоев в охлаждении; неправильную реакцию на неровности дороги из-за загрязнения;

проблемы с управлением высотой автомобиля; повреждение деталей подвески из-за ударов и вибраций [6].

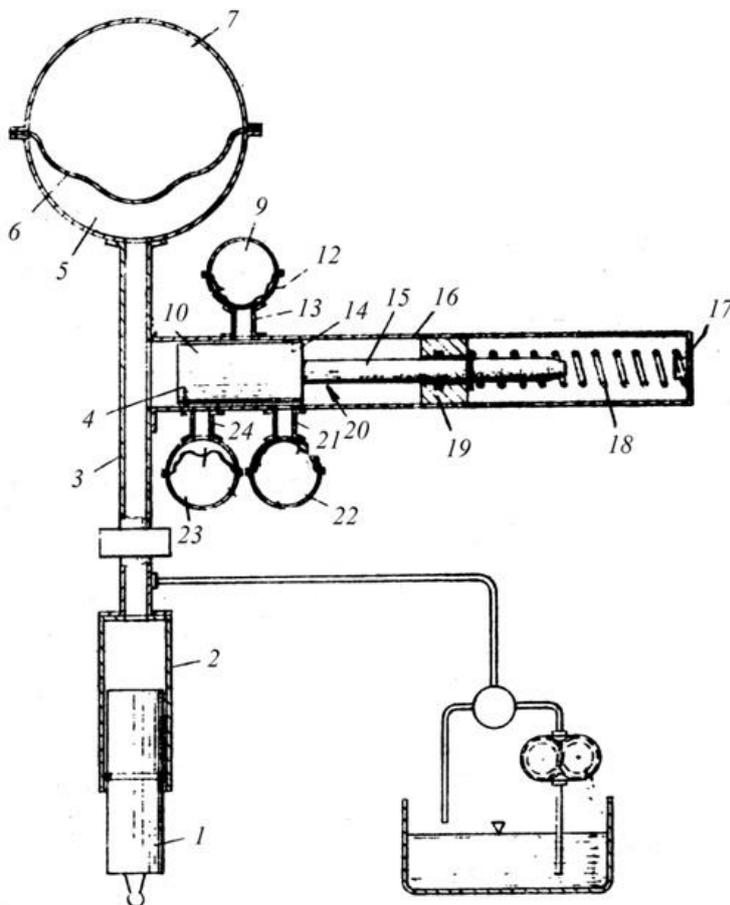


Рисунок 2 – Пневмогидравлическая подвеска автомобиля по патенту DE1555226A1 [6]

Пневмогидравлическая подвеска автомобиля по патенту DE1555226A1 состоит из: штока (1); цилиндра 2; гидромагистралей (3), (13), (21) и (24); креплений энергоаккумулятора (4); полости жидкости (5) и пневмополостей энергоаккумуляторов (7) и (9); эластичной диафрагмы (6); энергоаккумуляторов (8), (11), (22) и (23); трёхходового крана (20) с поршнем (10) и уплотнительной втулки – замка штока (19); эластичной диафрагмы энергоаккумулятора (12); магистрали к энергоаккумулятору; корпуса (17); пружины (18) (см. рис. 2). Рассматриваемая конструкция зависит от нагруженности транспортного средства. Поэтому возможны изменения жесткости подвески в зависимости от дорожных условий и стиля вождения, улучшение стабильности и управляемости автомобиля при разной нагрузке. К недостаткам часто относят высокую вероятность возникновения протечек или выхода из строя гидравлических элементов, а также ограниченную долговечность системы [6].

Конструктивная схема подвески типа независимой двухрычажной поперечной с активным гидроприводом на оси автомобиля является одним из самых эффективных решений для грузовых машин, поскольку обеспечивает оптимальную комбинацию маневренности, устойчивости и комфорта, характеризуется высокой прочностью и долговечностью, что позволяет снизить операционные затраты на обслуживание и ремонт [7].

Эффективность приведенных конструкций выражена в виде степеней сравнения, поэтому для принятия решения целесообразно ввести прогрессивную шкалу по критериям, как это делается довольно часто в подобных ситуациях [8]. В качестве критериев для сравнения конструктивных схем были выбраны: запас прочности узла подвески, под которым понимается прочность материалов элементов конструкции; срок эксплуатации конструкции в условиях РФ; плавность хода автомобиля.

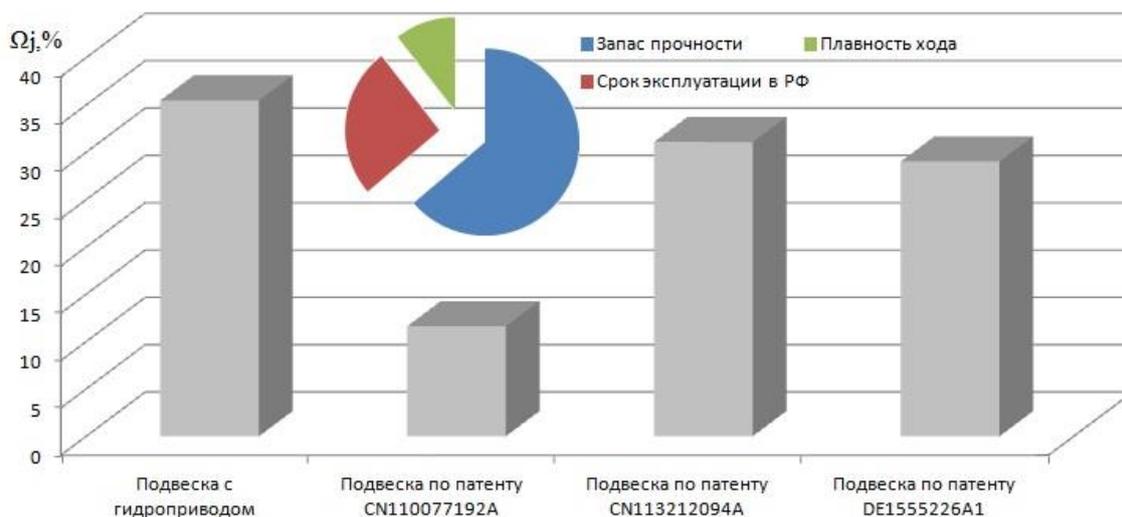


Рисунок 3 – Результаты сравнения конструктивных схем подвески автомобиля многокритериальным методом

Сравнение критериев проводилось вербально на основании опроса пользователей автомобилей. Поэтому коэффициенты их сравнительной значимости b_{ij} определялись по прогрессивной шкале отношений (3:5:7) [9]. Причем самым значимым был выбран такой критерий, как запас прочности узла подвески, затем срок эксплуатации в условиях РФ и, наконец, плавность хода (см. круговую диаграмму на рис. 3). По выбранным коэффициентам рассчитывался вектор матрицы сравнения ρ_i по формуле [9-11]:

$$\rho_i = \sqrt[k]{\prod_{l=1}^k b_{il}}, \quad (1)$$

где k – количество системно обоснованных критериев соответственно (в данном случае $k = 3$).

Затем на основании собранной информации о конструктивных схемах подвески с учетом их достоинств и недостатков по прогрессивной шкале формировались коэффициенты попарного сравнения альтернатив a_{ij} по каждому критерию отдельно [9-11]. По последним составлялась матрица:

$$\omega_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{m=1}^n a_{ijm}}, \quad (2)$$

где n – число сравниваемых схем подвески (в данном случае $n = 4$), где i – порядковый номер критерия сравнения, j – порядковый номер конструктивной схемы.

Для нормировки использовалось соотношение

$$\omega_{ijn} = \frac{\omega_{ij}}{\sum_{j=1}^n \omega_{ij}}, \quad (3)$$

Анализ осуществлялся по индикатору сравнения для каждой конструктивной схемы:

$$\Omega_j = \sum_i \rho_i \omega_{ijn}. \quad (4)$$

В результате сравнения выяснилось (см. гистограмму на рис. 3), что для выбранных критериев наиболее перспективной является схема с гидроприводом.

В заключение хотелось бы отметить, что применение многокритериального метода сравнения конструктивных схем в технологиях поиска решения является удобным обоснованием выбора в условиях комплексного анализа.

Авторы благодарят кандидата технических наук, доцента, доцента кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ВГЛТУ Никонова В.О. за помощь в работе над докладом и осуществлении грамотного патентного поиска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов, А.Г. Совершенствование гидропневматических подвесок гусеничных и колесных машин / А.Г. Осипов // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 4 (111). – С. 40-46.
2. Свиныаков, Д. С. Особенности применения гидропневматической подвески на боевых машинах / Д. С. Свиныаков, Г. Н. Толстухин // Электронный научный журнал. – 2016. – № 7(10). – С. 365-369.
3. Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е.Демин; под ред. В.И. Новосельцева. – Москва: Майор, 2006. – 592 с.
4. Patent for invention CN110077192A, IPC B60G17/0424. The adjustable half active Hydro-pneumatic Suspension system of rigidity and its regulation method; the applicant Yanshan University. № CN201910351347.3A ; stat. 2019.04.28 ; publ. 2020.09.18.
5. Patent for invention CN113212094A, IPC B60G17/0408. Leveling system and leveling method for hydro-pneumatic suspension vehicle with more than three shafts ; the applicant Shandong University of Technology. № CN202110608168.0A ; stat. 2021.06.01 ; publ. 2022.05.27.
6. Patent for invention DE1555226A1, IPC B60G17/04. Lastabhaengige hydro-pneumatische Federung ; the applicant Daimler Benz AG. № DE1967D0052401 ; stat. 1967.02.28 ; publ. 1977.05.12.
7. Ахтямов, Р.Ф. Гидропневматическая подвеска / Р.Ф. Ахтямов, А.Ф. Юнусов, А.З. Гумеров // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : Сборник научных трудов XI-ой Международной научно-практической конференции: в 4 томах, Курск, 19–21 марта 2014 года / Ответственный редактор: Горохов А.А. Том 1. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2014. – С. 151-154.
8. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.

9. Системный подход к проблеме обоснования модернизации лесозаготовительных машин / П.И. Попиков, Н.Ю. Евсикова, Н.С. Камалова, В.С. Полянин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – № 2, ч. 2 (13-2). – С. 296-300.

10. Кузнецов, Д.С. Применение метода анализа иерархий для обоснования выбора наиболее эффективного корчевателя / Д.С. Кузнецов, Е.В. Поздняков, Н.Ю. Евсикова // Воронежский научно-технический вестник. – 2020. – Т. 1, № 1 (26). – С. 91-95.

11. Оценка эффективности механизмов корчевательных машин методом сравнения альтернатив Саати / И.М. Бартенев, Е.В. Поздняков, А.К. Поздняков, М.В. Шавков // Воронежский научно-технический вестник. – 2018. – Т. 1, № 1 (23). – С. 91-95.

REFERENCES

1. Osipov, A.G. Improving hydropneumatic suspensions of tracked and wheeled vehicles / A.G. Osipov // Bulletin of IrSTU. – 2016. – No. 4 (111). – P. 40-46.

2. Svin'yakov, D.S. Features of the use of hydropneumatic suspension on combat vehicles / D.S. Svin'yakov, G.N. Tolstukhin // Electronic scientific journal. – 2016. – No. 7 (10). – P. 365-369.

3. Theoretical foundations of system analysis / V.I. Novosel'tsev, B.V. Tarasov, V.K. Golikov, B.E. Demin; edited by V.I. Novosel'tsev. – Moscow: Major, 2006. – 592 p.

4. Patent for invention CN110077192A, IPC B60G17/0424. The adjustable half active Hydro-pneumatic Suspension system of rigidity and its regulation method; the applicant Yanshan University. № CN201910351347.3A ; stat. 2019.04.28 ; publ. 2020.09.18.

5. Patent for invention CN113212094A, IPC B60G17/0408. Leveling system and leveling method for hydro-pneumatic suspension vehicle with more than three shafts ; the applicant Shandong University of Technology. № CN202110608168.0A ; stat. 2021.06.01 ; publ. 2022.05.27.

6. Patent for invention DE1555226A1, IPC B60G17/04. Lastabhaengige hydro-pneumatische Federung ; the applicant Daimler Benz AG. № DE1967D0052401 ; stat. 1967.02.28 ; publ. 1977.05.12.

7. Akhtyamov, R.F. Hydropneumatic suspension / R.F. Akhtyamov, A.F. Yunusov, A.Z. Gumerov // Modern instrumental systems, information technologies and innovations: Collection of scientific papers of the XI-th International scientific-practical conference: in 4 volumes, Kursk, March 19-21, 2014 / Editor-in-chief: Gorokhov A.A. Volume 1. – Kursk: Closed Joint-Stock Company "University Book", 2014. – P. 151-154.

8. Saati, T. Decision making. The method of analytic hierarchy process / T. Saati; trans. from English by R.G. Vachnadze. – Moscow: Radio i svyaz, 1993. – 278 p.

9. Systems approach to the problem of justifying the modernization of logging machines / P.I. Popikov, N.Yu. Evsikova, N.S. Kamalova, V.S. Polyaniin // Current areas of scientific research in the XXI-st century: theory and practice. – 2015. – No. 2, Part 2 (13-2). – P. 296-300.

10. Kuznetsov, D.S. Application of the method of hierarchy analysis to justify the choice of the most effective rooter / D.S. Kuznetsov, E.V. Pozdnyakov, N.Yu. Evsikova // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2020. – Vol. 1, No. 1 (26). – P. 91-95.

11. Evaluation of the efficiency of rooting machine mechanisms by comparing Saati alternatives / I.M. Bartenev, E.V. Pozdnyakov, A.K. Pozdnyakov, M.V. Shavkov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2018. – V. 1, No. 1 (23). – P. 91-95.

Секция 3. СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.58168/PBST_135-142

УДК 004.838.3

**НОВИЗНА КУРСОВ ПО ВЫБОРУ, ОСВЕЩАЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
КОНЦЕПЦИИ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА,
ДЛЯ УЧАЩИХСЯ ПО ПРОГРАММАМ СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
THE NOVELTY OF ELECTIVE COURSES HIGHLIGHTING THE MATHEMATICAL
CONCEPTS UNDERLYING ARTIFICIAL INTELLIGENCE, FOR STUDENTS
IN SECONDARY EDUCATION PROGRAMS**

Бович В.Я., студент магистратуры ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет», Череповец, Россия

Кашинцева О.А., кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой математики и информатики ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет», Череповец, Россия

Bovich V.Ya., Master's student, Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

Kashintseva O.A., PhD in Technical Sciences, Docent, Acting Head of the Department of Mathematics and Computer Science, Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

Аннотация. Статья рассматривает курс по выбору для учащихся среднего общего и профессионального образования, который погружает в мир математических концепций, лежащих в основе искусственного интеллекта. Идёт размышление о преимуществах такого подхода и его значимости для будущего образования.

Ключевые слова: новизна, курс по выбору, учащиеся, математические концепции, искусственный интеллект, образование.

Abstract. The article examines the elective course for students of secondary general and vocational education, which immerses them in the world of mathematical concepts underlying artificial intelligence. There is a reflection on the advantages of this approach and its importance for future education.

Keywords: novelty, elective course, students, mathematical concepts, artificial intelligence, education.

В настоящее время в мире происходит ускоренное внедрение технологических решений, разработанных на основе искусственного интеллекта, в различные отрасли экономики и сферы общественных отношений.

Современное общество сталкивается с постоянным ростом скорости обновления знаний и информации, что неизбежно приводит к изменению всех сфер человеческой жизни. Сегодня мир стоит на пороге развития экономики нового технологического поколения – цифровой экономики.

В России реализуется ряд программ и инициатив, призванных ответить на подобные вызовы современности. Одной из них является Национальная технологическая инициатива

(далее НТИ). Искусственный интеллект относят к сквозным технологиям НТИ, т.к. он оказывает наиболее существенное влияние на развитие всех рынков НТИ. В связи с чем спрос на квалифицированных специалистов в данной области увеличивается.

Математика и информатика являются той предметной областью, которая включает в себя методы и средства обработки информации, различные информационные и коммуникационные технологии. Считаем, что знакомство с ИИ может быть введено как курс по выбору в программу обучения школьников 10 классов физико-математического и информационно-технологического профилей. Знакомство с технологиями ИИ в школе позволит обучающимся не только понимать области применения ИИ, их возможности и ограничения в применении, но также даст возможность сориентироваться в выборе направления подготовки в университете, т.к. в последнее время профили, связанные с ИИ, интеллектуальными системами и технологиями, все чаще появляются в университетах. При этом, необходимо дать математический аппарат, который позволял бы в полной мере начать изучение технологий ИИ. Без знания математики невозможно дальнейшее развитие методов и систем ИИ. Вместе с тем, в настоящее время ни в курсе математики, ни в рамках курсов по выбору на уровне среднего образования не уделяется должного внимания рассмотрению математической составляющей технологий ИИ.

Учитывая вышеизложенное, проблема статьи обусловлена противоречием между развивающимися потребностями общества в интеллектуальных технологиях, в частности технологии ИИ, и недостаточным вниманием к данным технологиям в рамках среднего образования.

Современный мир стремительно меняется, и учебные программы для учащихся не всегда успевают соответствовать актуальным требованиям и вызовам времени. Необходимо обновление учебных программ для учащихся, чтобы они отражали последние тенденции и достижения в различных областях знаний, а также способствовали развитию навыков и компетенций, необходимых для успешной адаптации в современном обществе. Обновление учебных программ также позволит более эффективно подготавливать учащихся к будущей профессиональной деятельности и жизни в целом.

Цель данной статьи заключается в обосновании новизны курса по выбору «Математические основы искусственного интеллекта» для учащихся с целью определения его эффективности, актуальности и соответствия потребностям современного образования и общества.

В табл. 1 представлено содержание курса по выбору «Математические основы искусственного интеллекта» (36 часов) для школьников 10 классов физико-математического и информационно-технологического профилей. Новым в данном курсе можно считать систематизированную математическую базу для знакомства учащихся с темой ИИ.

Таблица 1 – Содержание курса

Номер темы	Тема в курсе	Основные понятия темы	Часы
1	Применение линейной функции для разделения разных типов данных.	Классификация, линейный классификатор, ошибка, сглаживание.	2
2	Линейный классификатор, для выяснения того, управляются ли данные логической функцией.	Классификация, линейный классификатор, булева функция И, ИЛИ, исключающее ИЛИ.	4
3	Основные этапы обучения искусственного интеллекта.	Предсказание, распознавание, нейронная сеть, слой, нейрон, вес, активационная функция.	4
4	Основные этапы обучения искусственного интеллекта.	Нейронная сеть, слой, нейрон, вес, функция активации, ступенчатая функция, сигмоида.	4
5	Матрицы как более простая и компактная форма для обеспечения быстрого и эффективного выполнения расчётов значений сигналов.	Матрица, умножение матриц, совместность матриц, вес, сигнал, обратное распределение ошибки, транспонированная матрица.	4
6	Метод градиентного спуска как метод вычисления ошибок весовых коэффициентов. Минимизация ошибки искусственного интеллекта.	Градиентный спуск, градиент, ложный минимум.	4
7	Физический и геометрический смысл производной. Правила дифференцирования.	Дифференциальное исчисление, производная, производная сложной функции.	4
8	Зависимость функции ошибки от весовых коэффициентов связей внутри нейронной сети.	Трёхслойная нейронная сеть, нейрон, функция ошибки, слой, вес, градиент, сигмоида, производная, коэффициент обучения, скалярное произведение матриц, транспонированная матрица, сглаживание, дифференциальное исчисление.	4
9	Экспертные системы как самостоятельное ведение в искусственном интеллекте. Процедуры логического вывода и эвристического поиска решений. Виды знаний и языки представления знаний.	Экспертная система, математическая логика, знание.	2
10	Логическая модель знаний и логика предикатов. Логические формулы и кванторы.	Предикат, квантор, логическая связь, высказывание.	4

Содержание курса по выбору построено таким образом, чтобы повторить и систематизировать программный материал, а также рассмотреть решение задач повышенного уровня сложности. Предложенный курс развивает умения и навыки решения различных

заданий, необходимые для продолжения образования, повышает математическую культуру, способствует реализации творческого потенциала личности обучающегося.

Программа имеет лекционную структуру, материал разбит на 10 тем. Учитель, реализующий программу курса по выбору, при составлении рабочей программы может располагать изучение отдельных тем в том порядке, который он считает более оправданным для данного класса или группы учащихся. Возможно составление рабочей программы из отдельных тем курса с учетом особенностей класса и результатов мониторинга учебных достижений учащихся по математике.

Виды деятельности на занятиях: работа в парах (группах) постоянного и переменного состава, самоконтроль и взаимоконтроль, консультация учителя, ученическое консультирование.

В рамках программы используется лекция как основная форма организации учебной деятельности. Лекционная форма организации учебной деятельности выбрана в соответствии с тем, что практически отсутствуют учебные пособия, и не фокусируется внимание на межпредметных связях по данной тематике в учебном плане среднего общего образования.

Лекция – это форма передачи учебной информации посредством ее последовательного изложения в устной форме. Лекция является способом передачи учебной информации, ориентированным на ее восприятие учащимися и активизацию их познавательных процессов. По сути, лекция представляет собой рассказ или объяснение учебного материала. Однако она имеет свои отличительные черты. Они состоят в следующем:

1. Изложение учебного материала носит последовательный и непрерывный характер.
2. Если сравнивать лекцию с рассказом или объяснением, то лекция характеризуется научной строгостью преподнесения информации.
3. Применение лекции для преподавания больших объемов информации.
4. Учебный материал, преподаваемый на лекциях, обладает насыщенным научным содержанием.
5. Использование во время лекции специальных педагогических приемов, ориентированных на повышение мыслительной активности и развитие внимания учащихся.

На лекциях можно использовать методы проблемного обучения, излагая материал как проблему, требующую разрешения. Тем самым учащиеся ориентируются на решение конкретной проблемы, что повышает их познавательную активность. Такая методика позволит существенно ускорить процесс освоения дисциплины, достаточно быстро сформировать целостное представление о ее возможностях для решения профессиональных задач.

Теперь коснёмся содержательной части данного курса. Искусственный интеллект (ИИ) является одной из самых перспективных и быстроразвивающихся областей современной науки и технологий. В основе его функционирования лежат математические принципы и методы, которые позволяют алгоритмам и компьютерным системам обучаться, принимать решения, анализировать данные и выполнять различные задачи на уровне человека, или даже превосходящем его способности [1].

Одним из ключевых направлений ИИ, является машинное обучение (классификация, кластеризация и регрессия), представленное с первой по четвертую тему курса. В нём

используются математические концепции, основанные на статистических методах и алгоритмах, которые позволяют компьютерным системам обучаться на основе данных, выявлять закономерности и шаблоны в информации, а затем применять эти знания для прогнозирования результатов, классификации объектов или решения других задач [2].

Другим важным направлением в области ИИ является вероятностное обучение и деревья решений (не представлено в данном курсе), в которых применяют теорию вероятностей и математическую статистику. Они позволяют оценивать вероятности различных событий, моделировать случайные процессы, а также принимать решения на основе статистических данных и выводов [2].

Также в разработке ИИ широко применяются линейная алгебра, математическая оптимизация, теория графов, дифференциальные уравнения (представлены в шестой и седьмой теме курса) и другие математические концепции. Например, линейная алгебра используется для работы с матрицами и векторами (представлено в пятой теме курса), оптимизация – для поиска оптимальных решений, теория графов – для моделирования связей между объектами и т.д. [2].

Другим важным направлением в области ИИ являются экспертные системы (представлены в девятой и десятой теме курса), в которых используется логика предикатов. Она позволяет при разработке систем искусственного интеллекта анализировать отношения между объектами и сущностями в системе, формализовать знания и правила, делать выводы на основе логических заключений и управлять процессом принятия решений [2].

Таким образом, обзор математических методов, используемых в работе искусственного интеллекта, подчеркивает важность математики как основы для создания инновационных технологий и умных систем, способных изменить мир вокруг нас.

Погружение учеников в мир математики и искусственного интеллекта (ИИ) имеет целый ряд значительных преимуществ, которые способствуют их обучению, развитию критического мышления и подготовке к современному информационному обществу. Рассмотрим некоторые из основных преимуществ этого подхода [3].

1. Развитие аналитического мышления.

Изучение математики и ИИ требует от учеников анализа информации, построения логических цепочек и решения сложных задач. Погружение в эти области помогает развивать у них аналитическое мышление, способность к логическому мышлению и аргументации.

2. Подготовка к цифровой экономике.

Математика и ИИ являются ключевыми компонентами цифровой экономики, поэтому понимание этих областей становится все более важным для успешной карьеры в будущем. Погружение в мир математики и ИИ помогает ученикам освоить необходимые навыки и знания для работы в сфере технологий.

3. Стимулирование творческого мышления.

Изучение математики и ИИ требует от учеников нестандартного подхода к решению задач, поиска новых методов и алгоритмов. Погружение в эти области способствует развитию творческого мышления, способности к инновациям и поиску новых решений.

4. Повышение уровня образования.

Знание математики и ИИ является важным элементом образования в современном мире. Погружение учеников в эти области позволяет им расширить свои знания, улучшить уровень образования и подготовиться к успешной карьере.

5. Развитие коммуникативных навыков.

Работа в команде, обсуждение идеи, объяснение своих решений – все это требует от учеников развития коммуникативных навыков. Погружение в мир математики и ИИ способствует развитию учеников как индивидуально, так и в коллективе.

6. Развитие критического мышления.

Изучение математики и искусственного интеллекта требует от учеников анализа, оценки и применения информации для решения сложных задач. Этот процесс способствует развитию критического мышления, способности к обоснованным выводам и принятию взвешенных решений.

7. Улучшение навыков решения проблем.

Математика и искусственный интеллект предоставляют ученикам возможность решать разнообразные задачи, которые требуют тщательного анализа и поиска оптимальных решений. Этот опыт помогает им развивать навыки поиска путей решения проблем, что является важным для будущей профессиональной деятельности.

8. Подготовка к технологическим профессиям.

В современном мире технологии играют все более важную роль в различных сферах деятельности. Изучение математики и искусственного интеллекта помогает ученикам освоить основы программирования, алгоритмического мышления и другие навыки, необходимые для работы в технологических профессиях.

9. Повышение конкурентоспособности на рынке труда.

Знание математики и основ искусственного интеллекта делает выпускников более конкурентоспособными на рынке труда. Работодатели все чаще ценят специалистов, обладающих навыками в областях математики и ИИ, что делает изучение этих предметов важным для успешной карьеры.

10. Стимулирование интереса к науке и технологиям.

Изучение математики и искусственного интеллекта может стимулировать учеников интересоваться наукой, технологиями и инновациями. Этот интерес может стать мощным двигателем для дальнейшего обучения и развития в сфере науки и технологий.

Таким образом, курс математики и искусственного интеллекта оказывает значительное влияние на развитие учеников, подготовку к будущим профессиям и формирование ключевых навыков, необходимых для успешной карьеры в современном информационном обществе.

Исходя из вышеперечисленных аспектов влияния курсов математики и искусственного интеллекта на развитие учеников, можно сделать следующие выводы и рекомендации по их внедрению в образовательные учреждения [3]:

1. Необходимость внедрения.

В современном мире, где технологии играют все более важную роль, внедрение курсов математики и искусственного интеллекта в образовательные программы становится

необходимостью. Эти предметы помогут ученикам развивать ключевые навыки для успешной карьеры в будущем.

2. Интеграция в учебный план.

Курсы математики и искусственного интеллекта должны быть интегрированы в учебный план школ и университетов, чтобы обеспечить полноценное изучение данных предметов и формирование необходимых навыков у учащихся.

3. Обучение квалифицированными специалистами.

Для успешной реализации курсов математики и искусственного интеллекта необходимо обеспечить наличие квалифицированных преподавателей, способных передавать знания и стимулировать интерес учеников к предметам.

4. Использование современных методик.

При внедрении курсов математики и искусственного интеллекта следует использовать современные методики обучения, включая интерактивные уроки, практические задания, проектную деятельность и другие формы работы, способствующие активному участию учеников.

5. Создание дополнительных возможностей.

Образовательные учреждения могут также создавать дополнительные возможности для учеников изучать математику и искусственный интеллект вне учебного плана, например, организуя кружки, семинары, летние школы или конкурсы по данной тематике.

6. Поддержка со стороны государства и бизнеса.

Государство и бизнес-сообщество могут оказывать поддержку образовательным учреждениям при внедрении курсов математики и искусственного интеллекта, например, путем предоставления финансовых средств, оборудования или организации партнерских программ).

В целом, внедрение курса по выбору «Математические основы искусственного интеллекта» в образовательные учреждения является важным шагом для подготовки учеников к будущим вызовам и возможностям, которые представляет современный мир. Правильное осуществление этого процесса требует комплексного подхода, с учетом вышеперечисленных рекомендаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ясницкий, Л.Н. Искусственный интеллект. Элективный курс: учебное пособие / Л.Н. Ясницкий, Ф.М. Черепанов. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 216 с.

2. Дайзенрот, М.П. Математика в машинном обучении : докопайся до сути / М.П. Дайзенрот, Фейзал А. Альдо, Чен Сунь Он. – Санкт-Петербург : Питер, 2024. – 512 с.

3. Новиков, Ф.А. Символический искусственный интеллект: математические основы представления знаний : учебное пособие для вузов / Ф.А. Новиков. – Москва : Издательство Юрайт, 2024. – 278 с.

4. Указ Президента РФ от 01.12.2016 г. № 642 (ред. от 15.03.2021) "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации" 01 декабря 2016 №642. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207967/ (Дата обращения: 1.03.2024).

5. Федеральный закон от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/ (Дата обращения: 1.03.2024).

REFERENCES

1. Yasnitsky, L.N. Artificial Intelligence. Elective Course: Textbook / L.N. Yasnitsky, F.M. Cherepanov. – Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory, 2012. – 216 p.

2. Deisenroth, M.P. Mathematics in Machine Learning: Get to the Core / M.P. Deisenroth, Faisal A. Aldo, Chen Sun On. – St. Petersburg: Piter, 2024. – 512 p.

3. Novikov, F.A. Symbolic Artificial Intelligence: Mathematical Foundations of Knowledge Representation: Textbook for Universities / F.A. Novikov. – Moscow: Yurait Publishing House, 2024. – 278 p.

4. Decree of the President of the Russian Federation of 01.12.2016 No. 642 (as amended on 15.03.2021) "On the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation" of 01 December 2016 No. 642. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207967/ (Accessed: 01.03.2024).

5. Federal Law of 29 December 2012 No. 273-FZ "On Education in the Russian Federation". – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/ (Accessed: 01.03.2024).

**РАЦИОНАЛИЗАТОРСКАЯ РАБОТА В НАУЧНОЙ И УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
КУРСАНТОВ****RATIONALIZATION WORK IN THE SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL ACTIVITIES
OF CADETS**

Бирюкова И.П., 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

Саврасова Н.А., кандидат физико-математических 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

Кузьмин А.Н., курсант ФГКВБОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Biryukova I.P., 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

Savrasova N.A., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Kuzmin A.N., cadet, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

Аннотация. В статье рассматривается проблема организации рационализаторской работы как составляющей научной и учебной деятельности курсантов военных инженерных вузов. Описываются способы привлечения курсантов к созданию рационализаторских предложений в рамках научной работы и лабораторных практикумов по физике и химии. Представлены примеры внедрения элементов рационализаторской деятельности в лабораторные работы по физике. Выполнение предлагаемых рекомендаций будет способствовать формированию у обучающихся в военных инженерных вузах компетенций в области научной и эксплуатационной деятельности.

Ключевые слова: рационализаторская работа, военно-научная работа курсантов, лабораторный практикум, компетенции, творческие способности.

Abstract. The article deals with the problem of organizing rationalization work as a component of cadets' scientific and educational activities at military engineering universities. Ways to involve cadets in creating rationalization proposals within the framework of scientific work and laboratory workshops in physics and chemistry are described. Examples of introducing elements of rationalization activities in laboratory works in physics are presented. The implementation of the proposed recommendations will contribute to the formation of competencies in the field of scientific and operational activities among cadets at military engineering universities.

Keywords: rationalization work, military-scientific work of cadets, laboratory workshop, competencies, creative abilities.

Согласно федеральным государственным образовательным стандартам в военных инженерных вузах осуществляется подготовка к научной и эксплуатационной деятельности специального назначения. Одной из творческих составляющих этих видов деятельности является рационализаторская работа, и соответствующие компетенции будущих офицеров необходимо начинать формировать уже на первом курсе при изучении общеобразовательных дисциплин и в процессе научной работы.

Исследователи, занимающиеся проблемой организации рационализаторской работы обучающихся в вузах, отмечают, что формирование компетентности будущих технических специалистов требует эффективных приемов активизации их творческого мышления и раскрытия индивидуальных способностей [1]. Участие курсантов в рационализаторской работе стимулирует их познавательную активность, формирует стремление к генерированию новых технических идей [2]. Установлена положительная корреляция между активностью курсантов в рационализаторской работе и академической успеваемостью [3]. Однако результативность технического творчества зависит от знаний основ изобретательства и рационализации [4], которые в настоящее время отсутствуют у большинства обучающихся, и это затрудняет привлечение их к рационализаторской деятельности. В военных вузах имеются дополнительные трудности, понижающие возможности курсантов в самостоятельной творческой деятельности, которые вызваны особенностями системы организации обучения и связаны с ограниченностью временных, информационных и материальных ресурсов [5]. Поэтому создание в военном вузе эффективной системы методического сопровождения рационализаторской работы курсантов представляет собой актуальную задачу.

В ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» рационализаторская работа курсантов традиционно осуществляется в рамках военно-научной работы. Она включает создание и усовершенствование экспериментальных установок для научных исследований. Например, в последнее время курсанты принимают активное участие в создании и модернизации разрабатываемых на кафедре физики и химии установок для определения спектров люминесценции, отражения и поглощения высокомолекулярных соединений, системы обнаружения замаскированных объектов, модели универсального трансмиссометра для работы в сложных метеорологических условиях и др. В рамках научной деятельности курсанты также расширяют и модернизируют учебно-экспериментальную базу кафедры. Например, внесены предложения по созданию учебных установок, демонстрирующих изучаемые в курсах физики и химии явления: рефракцию света, скин-эффект, переосаждение малорастворимых электролитов, а также раскрывающих физические и химические принципы действия различных технических устройств и приборов, в частности работы водородного топливного двигателя, двигателя Стирлинга, демпфирования подвижных частей измерительных приборов токами Фуко.

Необходимость в становлении военного инженера, способного к творческому выполнению профессиональных обязанностей и оперативному решению нестандартных задач, обуславливает целесообразность массового вовлечения курсантов в

рационализаторскую работу и внедрения ее элементов в учебный процесс. Среду для формирования компетенций в сфере рационализаторской работы можно организовать на основе лабораторных практикумов по физике и химии. Для этого надо разработать систему дополнительных заданий к лабораторным работам, предполагающих внесение изменений в лабораторные установки и методики измерений и включающих следующие типы задач.

Во-первых, предложения по усовершенствованию используемых лабораторных установок могут быть направлены на расширение задач экспериментальных исследований. Например, при выполнении лабораторной работы по измерению горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли курсантами было выдвинуто предложение о внесении в установку изменений, дающих возможность перемещать компас вдоль оси катушки с током и измерять расстояние до центра катушки с целью постановки задачи о нахождении зависимости напряженности магнитного поля, создаваемого током в катушке, от расстояния вдоль ее оси. Методика определения напряженности этого поля совпадает с методикой определения напряженности магнитного поля Земли при известном значении последней величины.

Во-вторых, рационализаторские предложения могут быть направлены на устранение систематических ошибок, обусловленных методиками экспериментов. Например, при выполнении лабораторной работы по нахождению баллистических характеристик полета пули, выпущенной из пружинного пистолета, измеренная дальность полета статистически значимо отличается от рассчитанной теоретически вследствие того, что точка вылета пули поднята над точкой приземления на высоту пистолета. В то же время метод теоретического расчета предполагает, что эти точки располагаются на одинаковом уровне по вертикали. В рассматриваемой ситуации курсанты могут сделать предложения по устранению получаемого несоответствия экспериментальных результатов теоретическим двумя способами: вывести расчетную формулу с учетом высоты пистолета, что приведет к усложнению расчетной формулы и возрастанию требуемого на вычисления времени, или выровнять уровни точек вылета и приземления пули, разработав соответствующее техническое решение.

Третий вид проблем, требующий усовершенствования лабораторных установок и методик измерений, состоит в необходимости уменьшения случайных ошибок измерений. Например, в лабораторной работе «Измерение емкостей конденсаторов и их соединений» отношение зарядов конденсаторов неизвестной и известной емкостей заменяется отношением максимальных токов разрядки этих конденсаторов. Так как разрядка конденсаторов происходит довольно быстро, возникает проблема точности определения тока разрядки по шкале миллиамперметра. Знание закономерностей процессов релаксации в электрических цепях, содержащих конденсаторы и резисторы, позволяет курсантам внести предложение о включении в цепь миллиамперметра резистора для уменьшения скорости изменения тока разрядки, предварительно выполнив оценочные расчеты требуемого сопротивления.

Четвертым направлением рационализаторской работы в рамках лабораторного практикума является разработка новых методик измерений или использование дополнительных приборов. Например, в лабораторной работе по изучению законов теплового излучения интенсивность излучения часто измеряется с помощью фотоэлемента. Знание процессов, происходящих в полупроводниках под действием электромагнитного излучения,

позволяет курсантам выдвинуть предложение о замене фотоэлемента на тиристор и находить энергетическую светимость по тепловому действию излучения.

Опыт проведения лабораторных работ с постановкой задач усовершенствования лабораторных установок показывает, что курсанты активно включаются в поиск новых методик экспериментов и способов улучшения оборудования, если видят конкретные проблемы, требующие решения. Преподаватель получает дополнительные возможности в реализации активных методов обучения, таких как дискуссия, метод проектов, метод эвристических вопросов, «мозговой штурм», работа в малых группах. При этом решаются следующие обучающие и развивающие задачи:

- повышение заинтересованности и активности курсантов;
- достижение более глубокого понимания закономерностей изучаемых явлений, формирование умений использовать полученные знания для решения практических задач;
- развитие способности выявлять проблемы и находить способы их решения;
- повышение общей технической грамотности и приобретение знаний принципов работы конкретных измерительных приборов;
- осуществление связей с другими разделами изучаемой дисциплины и междисциплинарных связей.

Таким образом, внедрение элементов рационализаторской работы в лабораторные практикумы по физике и химии, а также привлечение курсантов к рационализаторской деятельности в рамках военно-научной работы позволяет формировать компетенции в области научной деятельности, развивать умения решать нестандартные задачи при эксплуатации технических средств и измерительных приборов, повышать творческий потенциал будущих военных инженеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боярова, Е.В. Формирование профессиональных компетенций у студентов инженерных специальностей / Е.В. Боярова // Среднее профессиональное образование. – 2014. – № 12. – С. 21-23.

2. Грачев, И.И. Роль рационализаторской и изобретательской работы в активизации образовательного процесса в военном вузе / И.И. Грачев, В.Я. Савицкий, Е.С. Григорян // Молодежь. Образование. Наука. – 2023. – № 1 (18). – С. 12-17.

3. Негуторов, Н.В. Рационализаторская работа и ее место в профессиональной подготовке курсантов высшего военного учебного заведения / Н.В. Негуторов, А.И. Кузнецов, В.Г. Крест // Современные проблемы науки и образования. – 2019. – № 1. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=28529> (Дата обращения: 09.04.2024).

4. Слепнева, Н.Г. Развитие профессиональных компетенций у студентов в области рационализаторской деятельности / Н.Г. Слепнева, Г.М. Гринберг // Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2022. – С. 837-839.

5. Веприяк, И.А. Организационные и методические аспекты рационализаторской работы в высшем военном учебном заведении / И.А. Веприяк, С.Д. Чижумов,

Н.Н. Случанинов // Специальная техника и технологии транспорта. – 2023. – № 19. – С. 194-202.

REFERENCES

1. Boyarova, E.V. Formation of professional competencies among students of engineering specialties / E.V. Boyarova // Secondary vocational education. – 2014. – No. 12. – P. 21-23.
2. Grachev, I.I. The role of rationalization and inventive work in activating the educational process in a military university / I.I. Grachev, V.Ya. Savitsky, E.S. Grigoryan // Youth. Education. Science. – 2023. – No. (18). – P. 12-17.
3. Negutorov, N.V. Rationalization work and its place in the professional training of cadets of the higher military educational institution / N.V. Negutorov, A.I. Kuznetsov, V.G. Krist // Modern problems of science and education. – 2019. – No. 1. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=28529> (Date of application: 04/09/2024).
4. Slepneva, N.G. Development of professional competencies among students in the field of rationalization activities / N.G. Slepneva, G.M. Grinberg // Reshetnev readings : materials of the XXVI International scientific and practical conference dedicated to the memory of the general designer of rocket and space systems, Academician M.F. Reshetnev. – Krasnoyarsk, 2022. – P. 837-839.
5. Veprinyak, I.A. Organizational and methodological aspects of rationalization work in higher military educational institution / I.A. Veprinyak, S.D. Chizhiumov, N.N. Chastaninov // Special equipment and technologies of transport. – 2023. – No. 19. – P. 194-202.

**К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОТИВАЦИОННОЙ
НАСТРОЕННОСТИ ГРУППЫ ПРИ ОСВОЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ФИЗИКА»**
ON THE QUESTION OF THE POSSIBILITY OF SIMULATING THE MOTIVATIONAL
MOOD OF A GROUP WHEN MASTERING THE DISCIPLINE "PHYSICS"

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

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

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Внукова С.В., кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Агафонова М.В., преподаватель СПО ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. 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

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

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

Vnukova S.V., PhD in Physics and Mathematics, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Agafonova M.V., college teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Понимание степени влияния мотивации студентов на выработку компетенций в процессе выполнения учебного плана по дисциплине «Физика» может служить основой для развития технологий планирования преподавателем групповых занятий в техническом вузе. В работе в рамках системного подхода предложена макродинамическая модель, описывающая студенческую группу в пространстве критериальных классов намерений студентов. В результате анализа результатов тестирования с использованием фонда оценочных средств и данных модульно-рейтинговой системы оценки успеваемости студентов по дисциплине «Физика» выявлено, что успеваемость группы определяется распределением студентов по критериальным классам намерений.

Ключевые слова: системный анализ, теория конфликтов, мотивация, квалиметрия в образовании, логико-лингвистическое моделирование.

Abstract. Understanding the degree of influence of students' motivation on the development of competencies in the process of implementing the curriculum in the discipline "Physics" can serve

as a basis for the development of technologies for planning group classes by a teacher in a technical university. In the work, within the framework of the system approach, a macrodynamic model has proposed that describes a student group in the space of criterion classes of students' intentions. As a result of the analysis of the test results using the fund of assessment tools and data from the modular-rating system for assessing students' academic performance in the discipline "Physics", it has revealed that the group's academic performance is determined by the distribution of students by criterion classes of intentions.

Keywords: system analysis, conflict theory, motivation, qualimetry in education, logical-linguistic modeling.

Понятие «качество образования» впервые появилось в начале девяностых годов прошлого века в связи с формированием государственного контроля за качеством образования в Российской Федерации [1]. Поэтому вопрос о трактовке этого понятия широко обсуждается в статьях, посвященных методическим вопросам образовательных технологий. При этом многие авторы отмечают, что спектр интерпретации этого понятия весьма обширен и противоречив [1-3]. С одной стороны, в трактовке, закрепленной в Федеральном законе «Об образовании в Российской Федерации», под «качеством образования» понимается соотнесения уровня подготовки с утвержденной системой стандартов и интересами и потребностями участников образовательных отношений (потребителей профессиональных кадров, студентов, административных органов контроля и т.д.) [1]. С другой стороны, это понятие связано со способностью вузов к формированию квалифицированных кадров, способных обеспечить устойчивое развитие экономики страны [1, 2].

Не менее острая дискуссия существует в литературе по вопросам оценки образовательных услуг [2] и методов повышения качества образования профессиональных кадров. Часть авторов полагает, что необходимо совершенствовать и развивать инструмент оценивания деятельности преподавателя как студентами, так и коллегами [2, 3]. Другие предлагают преподавателям строить учебный процесс с учетом профессиональных интересов студентов [4], проводя факультативные занятия [5], тем самым формируя и стимулируя мотивацию к изучению, например, такой сложной дисциплины как физика у студентов технического и медицинского направлений подготовки. При этом интересно, что опубликовано сравнительно мало результатов исследования намерений самих студентов.

Цель данной работы – рассмотреть в рамках теории конфликтов возможность моделирования успеваемости группы студентов на основе данных их распределения по укрупненным классам намерений методами технологий мягких вычислений.

Поскольку современные нормативные акты определяют нагрузку преподавателя из расчета, что на каждого приходится двенадцать студентов, то занятия носят не индивидуальный, а именно групповой характер. Учитывая эту реальность, образовательную деятельность преподавателя целесообразно моделировать как управление конфликтом. Под конфликтом в системном анализе понимается управляемый процесс, которым можно привести систему (в данном случае группу студентов) к нужному состоянию путем целенаправленного воздействия на ее морфологию [6]. В рамках такого подхода можно использовать макродинамическую модель развития конфликта в пространстве критериальных классов его

укрупненных состояний в рассматриваемой ситуации. Вообще говоря, обычно выделяют такие классы состояний как противодействие, содействие, эксплуатация и нейтралитет. Группа обучающихся и преподаватель относятся к текущему учебному процессу по-разному. В любой группе существуют студенты, настроенные на усвоение материала и стремящиеся для этого наладить контакт с преподавателем, такие студенты формируют компоненту содействующих образовательной деятельности. С другой стороны, не редко можно встретить студентов, готовых участвовать в учебном процессе с целью гарантированно успешного прохождения аттестации по дисциплине. Они используют (эксплуатируют) учебный процесс для достижения этой цели (таких студентов можно назвать целеполагающими). В процессе группового занятия довольно быстро выявляются студенты, слабо заинтересованные в освоении дисциплины, обычно на их состояние более влияют какие-то сторонние факторы (ухудшение здоровья, проблемы личного характера, общественная деятельность, сфера сторонних интересов). Про таких студентов можно сказать, что они нейтральны к учебному процессу (самостоятельные). Наконец, в любой группе присутствуют негативно настроенные члены (скептики), которые будут противодействовать преподавателю пассивно (пропуски занятий) или активно (попытки сорвать занятие или превратить его в бессмысленную дискуссию на посторонние темы).

В предлагаемом исследовании моделирование группы обучающихся, как совокупности четырех укрупненных компонент, сформированных из студентов со схожими намерениями, осуществлялось в рамках метода мягких вычислений. Для количественной оценки интервалов принадлежности Δ_i использовались данные модульно-рейтинговой системы учета успеваемости (МРС), как удобного инструмента [7-8] для анализа степени выполнения учебного плана каждым студентом. Интервалы принадлежности определялись соотношением

$$\Delta_i = 100 \frac{R_i}{R_{\max}} (\%), \quad (1)$$

где R_i – индивидуальный рейтинг успеваемости; R_{\max} – максимально возможный рейтинг. К первой компоненте (содействующие) относились студенты, выполняющие задания полностью и в установленные сроки в процессе обучения ($\Delta_i > 90\%$), ко второй компоненте (целеполагающие) – обучающиеся с $75\% < \Delta_i < 90\%$ (именно такое выполнение учебного плана гарантировало получение положительной оценки без промежуточного испытания). К третьей компоненте (самостоятельные) были отнесены студенты с $60\% < \Delta_i < 75\%$ (что соответствовало оценке «удовлетворительно» с возможностью повысить оценку на промежуточном испытании). Последняя компонента группы (скептики) обычно в течение учебного процесса набирала меньше 60% от максимально возможного рейтинга [7, 8].

На рис. 1 приведены результаты анализа успеваемости по дисциплине «Физика» в 2023-2024 учебном году на основе МРС в группах студентов первого курса по направлениям подготовки бакалавров: 27.03.05 Инноватика (гр. УИ2-231-ОБ); 09.03.02 Информационные системы и технологии (гр. ИС2-234-ОБ (профиль – Технологии и проектирование информационных систем) и ИМ2-231-ОБ (профиль – Информационные системы и технологии в микроэлектронике)); 15.03.06 Мехатроника и робототехника (МР2-231-ОБ). Анализировалось отношение δ_i числа студентов, проявивших принадлежность к компоненте, к общей численности группы:

$$\delta_i = \frac{N_i}{N_0}, \quad (2)$$

где N_i – количество студентов с Δ_i ; N_0 – численность группы.

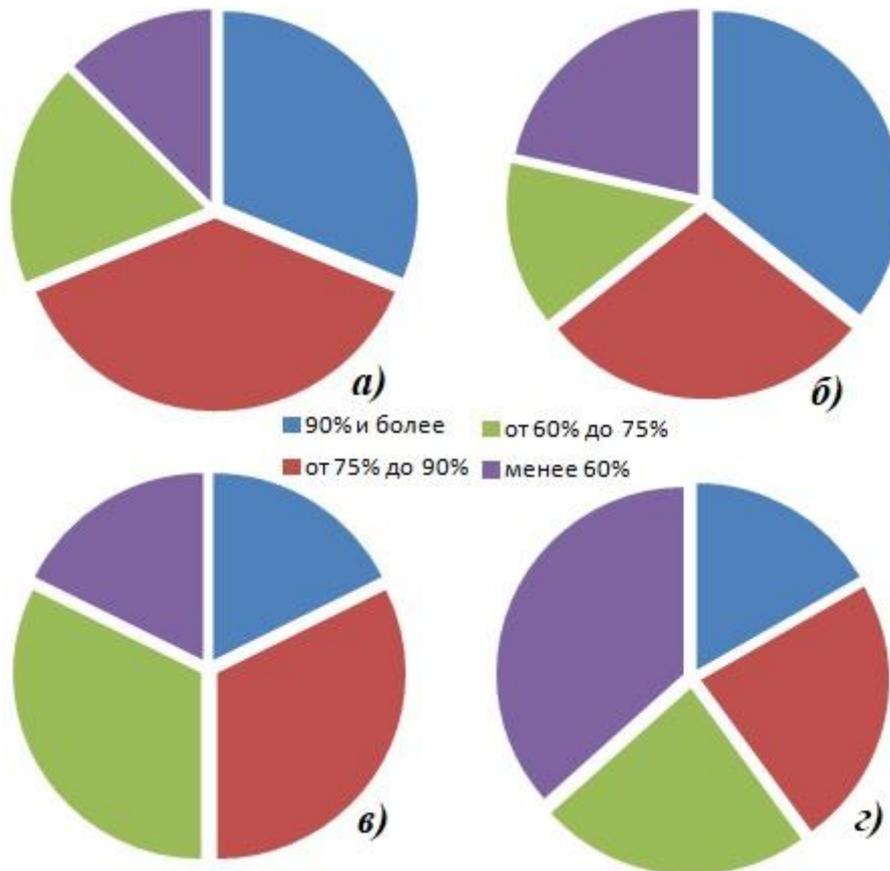


Рисунок 1 – Диаграммы доли в процентах от общего количества студентов по компонентам намерений, полученные по результатам МРС для бакалавров, обучающихся в группах:
 а) УИ2-231-ОБ; б) МР2-231-ОБ; в) ИС2-234-ОБ; г) ИМ2-231-ОБ

Для сравнения определялось распределение студентов по компонентам группы по результатам тестирования, как самого популярного инструмента оценки качества образования [9], по заданиям фонда оценочных средств. В этом случае использовалось соотношение:

$$\Delta_i = 100 \frac{S_i}{S_{\max}} (\%), \quad (3)$$

где S_i – сумма баллов, соответствующая интервалу принадлежности i -ой компоненты; S_{\max} – максимально возможная сумма баллов после успешно пройденного теста. Интервалы принадлежности, соответствующие компонентам, показаны на рис. 2.

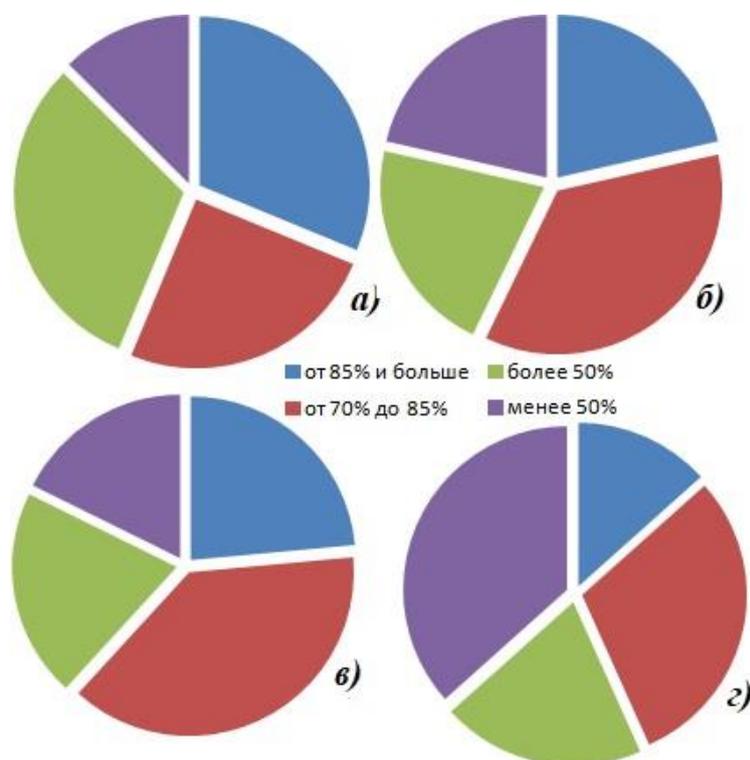


Рисунок 2 – Диаграммы доли в процентах от общего количества студентов по компонентам намерений, полученные по результатам тестирования для бакалавров, обучающихся в группах: а) УИ2-231-ОБ; б) МР2-231-ОБ; в) ИС2-234-ОБ; г) ИМ2-231-ОБ

Первая группа (УИ2-231-ОБ) обучается на экономическом факультете и плохо понимает необходимость освоения дисциплины «Физика», но отличается высокой мотивацией к выполнению учебного плана, поскольку студентам предстояло либо сдать экзамен, либо набрать высокий рейтинг и получить оценку без промежуточной аттестации. Распределение студентов (в процентах от общего количества в группе) по компонентам отличается неравномерностью (см. рис. 1, а), большинство студентов принадлежат первым двум компонентам, а компонента скептиков самая малочисленная из всех. После прохождения теста выяснилось, что члены второй группы (целеполагающие) выполняли задания формально для получения отличной оценки. Для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 15.03.06 Мехатроника и робототехника (МР2-231-ОБ) (см. рис. 1, б), относящемуся к укрупненной группе специальностей «Техника и технологии», дисциплина «Физика» является одной из формирующих базу для основных компетенций. Видимо поэтому большинство студентов принадлежат к первым двум компонентам. Однако результаты тестирования показывают, что основная часть из них относятся к целеполагающей компоненте. В группе ИС2-234-ОБ (см. рис. 1, в) после прохождения теста доля студентов, относящихся к первым двум компонентам, оказалась больше, чем по данным МРС, это говорит об изменении намерений некоторых обучающихся в результате освоения дисциплины.

Для сравнительного анализа определили отношение средней суммы баллов в группе к максимально возможной после прохождения теста:

$$\langle S \rangle = 100 \frac{\sum_{j=1}^{N_0} S_j}{N_0 S_{\max}} (\%), \quad (4)$$

где S_j – сумма баллов, набранная j -м студентом после прохождения теста. Результаты сравнения представлены на рис. 3. Проведенный анализ выявил, что величина $\langle S \rangle$ увеличивается с уменьшением численности «скептиков».

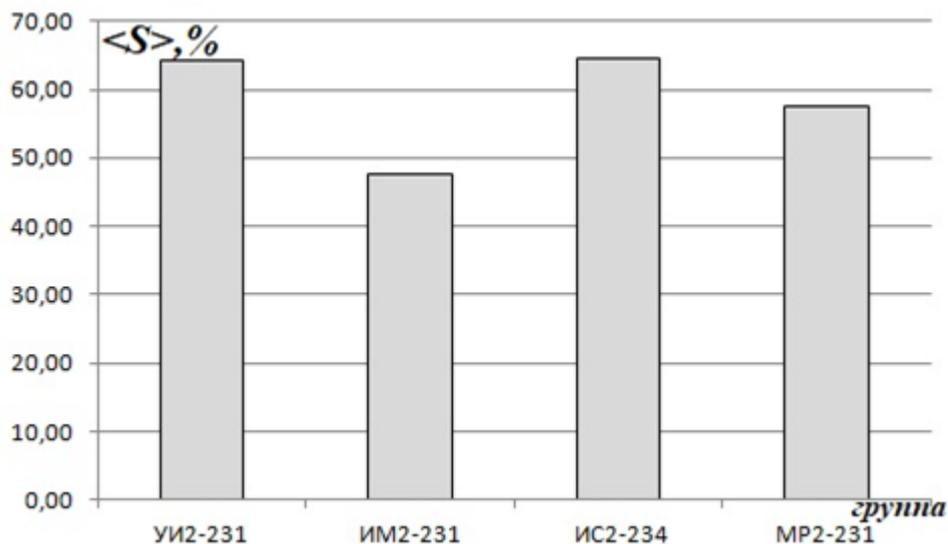


Рисунок 3 – Сравнение среднего в группе процента выполнения теста по фонду оценочных средств по дисциплине «Физика»

В заключение хотелось бы отметить, что моделирование взаимоотношений обучающихся с преподавателями в рамках теории конфликтов позволяет учесть намерения студентов при выборе методики работы с группой. Результаты анализа данных тестирования и МРС позволяют обоснованно полагать, что предложенный подход адекватно отражает мотивационные настроения обучающихся в группе. Кроме того, успеваемость студентов во многом определяет их распределение по компонентам намерений, а преподаватель путем влияния на морфологию группы может управлять развитием конфликта, процентом «содействующих» и «целеполагающих» студентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдашкин, А.А. Подходы к определению понятия "качество образования" / А.А. Авдашкин, А.А. Пасс // Научно-методическое обеспечение оценки качества образования. – 2018. – №2 (5). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-opredeleniyu-ponyatiya-kachestvo-obrazovaniya-1> (Дата обращения: 30.04.2024).
2. Полянская, Н.М. Роль преподавателя в повышении качества образовательного процесса в высшем учебном заведении / Н.М. Полянская // Интернет-журнал «Мир науки». – 2015. – №3. – URL: <http://mir-nauki.com/PDF/48PDMN315.pdf>.

3. Осипова, Л.Б. Образ преподавателя технического вуза глазами студентов / Л.Б. Осипова, И.В. Толстоухова // Вестник Сургутского государственного педагогического университета. – 2022. – № 5 (80). – С. 61-66.

4. Плащевая, Е.В. Формирование мотивационной активности будущих врачей при изучении физики / Е.В. Плащевая, Н.В. Нигей // Проблемы управления качеством образования: сборник статей XIII Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 28–29 декабря 2020 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2020. – С. 136-139.

5. Никитин, П.В. Повышение эффективности обучению физике средствами факультатива "Физические основы информационной безопасности" / П.В. Никитин // Современное образование. – 2020. – № 2. – С. 28-42. – DOI: 10.25136/2409-8736.2020.2.33254.

6. Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е. Демин; под ред. В.И. Новосельцева. – Москва: Майор, 2006. – 592 с.

7. Хрящев, В.Г. Практика применения модульно-рейтинговой системы обучения в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Г. Хрящев, В.И. Серегин // Инженерный вестник. – 2014. – №12. – С. 1013-1023.

8. Модульно-рейтинговая система аттестации и контроль качества обучения студентов / Н.Н. Матвеев, В.И. Лисицын, Н.С. Камалова, Н.Ю. Евсикова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Проблемы высшего образования. – 2015. – №3. – С. 28-33.

9. К вопросу о применении тестирования при проверке качества образования / Н.С. Камалова, Н.Ю. Евсикова, А.А. Полумиско, К.А. Уварова, А.М. Хворых // Современные технологии непрерывного обучения школа-вуз : материалы X Всероссийской научно-методической конференции / под общ. ред. В.Н. Попова ; Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж, 2023. – С. 97-98.

REFERENCES

1. Avdashkin, A.A. Approaches to defining the concept of "quality of education" / A.A. Avdashkin, A.A. Pass // Scientific and methodological support for assessing the quality of education. – 2018. – No. 2 (5). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-opredeleniyu-ponyatiya-kachestvo-obrazovaniya-1> (Accessed: 30.04.2024).

2. Polyanskaya, N.M. The role of the teacher in improving the quality of the educational process in a higher educational institution / N.M. Polyanskaya // Internet magazine "World of Science". – 2015. – No. 3. – URL: <http://mir-nauki.com/PDF/48PDMN315.pdf>.

3. Osipova, L.B. The image of a technical university teacher through the eyes of students / L.B. Osipova, I. V. Tolstoukhova // Bulletin of the Surgut State Pedagogical University. – 2022. – No. 5 (80). – P. 61-66.

4. Plashcheyaya, E.V. Formation of motivational activity of future doctors in the study of physics / E.V. Plashcheyaya, N.V. Nigey // Problems of quality management in education: collection of articles from the XIII All-Russian scientific and practical conference, Penza, December, 28-29, 2020. – Penza: Penza State Agrarian University, 2020. – P. 136-139.

5. Nikitin, P.V. Improving the efficiency of teaching physics by means of the elective "Physical Foundations of Information Security" / P.V. Nikitin // Modern education. – 2020. – No. 2. – P. 28-42. – DOI: 10.25136/2409-8736.2020.2.33254.

6. Theoretical foundations of systems analysis / V.I. Novosel'tsev, B.V. Tarasov, V.K. Golikov, B.E. Demin; edited by V.I. Novosel'tsev. – Moscow: Major, 2006. – 592 p.

7. Khryashchev, V.G. Practice of applying the modular-rating system of training at Bauman Moscow State Technical University / V.G. Khryashchev, V.I. Seregin // Engineering Bulletin. – 2014. – No. 12. – P. 1013-1023.

8. Modular-rating system of certification and quality control of student education / N.N. Matveev, V.I. Lisitsyn, N.S. Kamalova, N.Yu. Evsikova // Bulletin of Voronezh State University. Series: Problems of Higher Education. – 2015. – No. 3. – P. 28-33.

9. On the issue of using testing in checking the quality of education / N.S. Kamalova, N.Yu. Evsikova, A.A. Polumisko, K.A. Uvarova, A.M. Khvorykh // Modern technologies of continuous learning school-university: materials of the X All-Russian scientific and methodological conference / under the general editorship of V.N. Popov; Voronezh. state univ. ing. technol. – Voronezh, 2023. – P. 97-98.

РОЛЬ КЕЙС-ЗАДАНИЙ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ
THE ROLE OF CASE TASKS IN THE EDUCATIONAL PROCESS

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

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

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Майорова Т.Л., кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Ефанова Н.Д., преподаватель СПО ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. 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

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

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

Mayorova T.L., PhD in Physics and Mathematics, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Efanova N.D., college teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В настоящий момент перед преподавателями высшей школы стоит задача формирования у обучающихся компетенций по решению комплексных проблем в рамках системного подхода. В работе на примере решения задачи выбора маршрута движения в пункт назначения показано, что ситуативный метод ведения занятий позволяет студентам различных направлений подготовки при освоении дисциплины «Физика» выработать компетенции в соответствии с современными государственными стандартами. В результате анализа времени нахождения в пути студенты в процессе коллективной работы получают возможность выработать навыки обоснования решения на базе существующих физико-математических подходов к моделированию ситуаций, максимально приближенных к реальности.

Ключевые слова: системный анализ, ситуативный метод обучения, кейс-задания, компетентностный подход, требования государственных стандартов образования.

Abstract. Currently, higher education teachers are faced with the task of developing students' competencies in solving complex problems within the framework of a systems approach. In the work, using the example of solving the problem of choosing a route to a destination, it is shown that the situational method of conducting classes allows students of various fields of study to develop

competencies in accordance with modern state standards when mastering the discipline "Physics". As a result of analyzing the time spent on the road, students in the process of collective work have the opportunity to develop skills in substantiating a solution based on existing physical and mathematical approaches to modeling situations that are as close to reality as possible.

Keywords: system analysis, situational teaching method, case assignments, competency-based approach, requirements of state education standards.

В сфере образовательной деятельности в настоящее время существует тенденция, направленная на развитие у обучающихся навыков принятия решения в реальных ситуациях [1-3]. Требования к освоению дисциплин формулируются в виде компетенций с применением таких слов как «способен...». Например, общепрофессиональная компетенция может определяться так: «Способен применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности» (ОПК-1). Для всех направлений подготовки студентов обязательна такая универсальная компетенция, как «Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий» (УК-1). Овладение этими компетенциями достигается при изучении конкретных дисциплин, например, физики. Перед преподавателями ставится задача формирования у студентов индивидуальной технологии применения полученных знаний при возникновении реальной проблемной ситуации. Решение такой задачи требует от работников высшей школы уверенного владения способами имитации в учебном процессе реальных событий и умений варьировать их сложность в соответствии с усвоенным материалом. На сегодняшний день для выполнения требований к освоению дисциплин применяются ситуативные педагогические технологии (кейс-технологии) [2-4]. Этот метод основан на поиске возможных вариантов решения проблем (ситуаций), описание которых строится на реальных фактах, и не имеющих однозначного решения [1-3]. Другими словами, студентам предлагается столкнуться с задачей, обладающей такими особенностями как вариативность результата решения, неоднозначность выбора и рискованность. Подобные проблемы являются системными [5] и требуют применения комплексных методов исследования. Вопреки бытующему стихийному представлению, что «жизнь научит», практика показывает, что развитие системного мышления результативнее, если протекает постепенно с нарастанием сложности. Применение системного подхода существенно зависит от знания соответствующей идеологии и методов специальных дисциплин. Технологии принятия решения включают в себя стратификацию проблемы (ситуации), разработку описания системы решения в пространстве функциональных факторов и исследование динамики процессов в рамках модельного эксперимента [5]. На современном этапе внедрение кейс-технологий необходимо осуществлять постепенно, чтобы студенты могли выработать индивидуальные навыки принятия решения в реальных ситуациях.

Целью данной работы является демонстрация возможностей кейс-технологий при освоении дисциплины «Физика» на примере рассмотрения ситуации выбора оптимального маршрута следования к точке назначения.

При столкновении с системной проблемой группа студентов в первую очередь выясняет, что каждый из них представляет ее по-разному, таким образом, формируется

понимание многоаспектности реальных ситуаций. Например, при освоении законов движения объекта, как материальной точки, предлагается выбрать оптимальный маршрут следования между двумя точками на карте города. На первом этапе студентам необходимо выбрать варианты путей следования и представить их в виде направленного графа (см. рис. 1). Представление путей решения в виде направленного графа формирует навык систематизации информации [5] (в данном случае понимания, что каждый маршрут является совокупностью элементов (переездов), количество N_{Π} которых индивидуально для каждого маршрута).

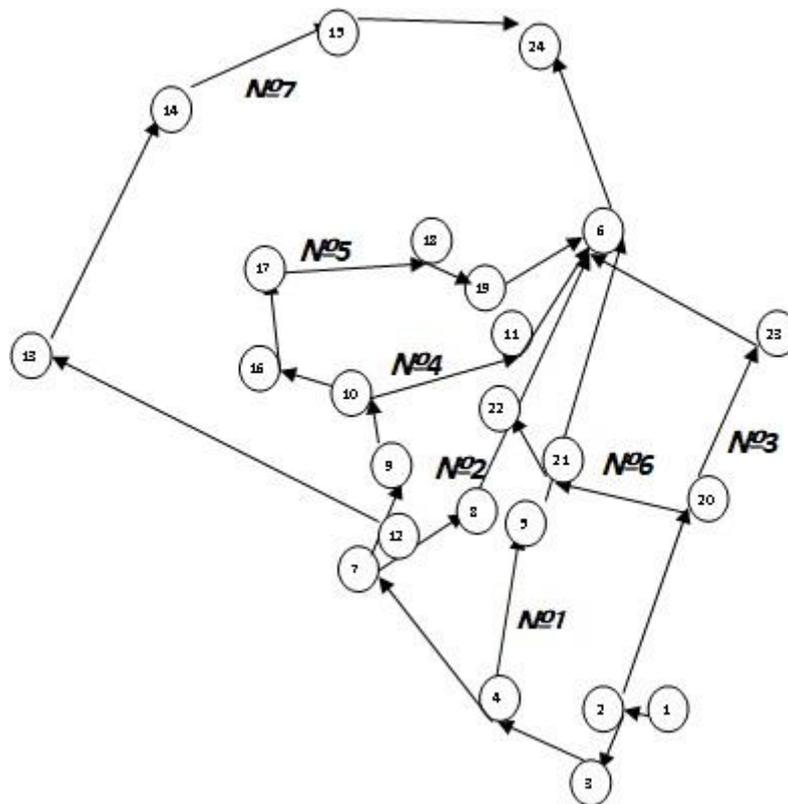


Рисунок 1 – Направленный граф вариантов маршрута из пункта 1 в пункт 24 (путем дискуссии были выбраны 7 маршрутов, обозначенных номерами)

Поскольку каждый маршрут состоит из переездов, описываемых схожими по величине факторами, то на втором этапе протекает обсуждение применения основ факторного анализа к описанию маршрутов в пространстве их параметров сравнения (функциональных факторов). Чаще всего в процессе обсуждения останавливаются на длине переезда в километрах (L), количестве светофоров (N_c), максимально допустимой скорости в километрах в час (V_{\max}) и среднем по наблюдениям времени простоя в минутах (время простоя в «пробках») (Δt_{Π}).

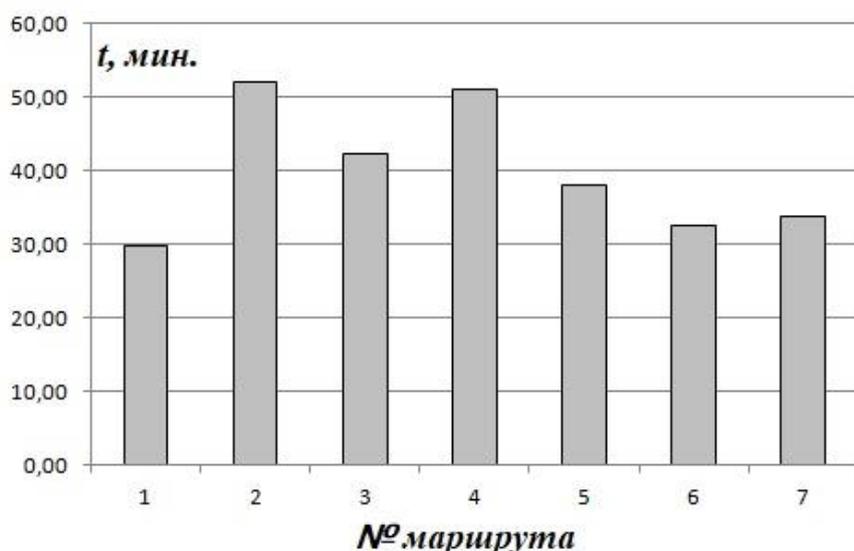


Рисунок 2 – Сравнительная гистограмма маршрутов следования по времени нахождения в пути

На следующем этапе происходит обсуждение такого вопроса, как выбор критерия эффективности [5]. В качестве примера было выбрано прогнозируемое время в пути t на маршруте. Затем встает вопрос, как оценить его величину по известным факторам элементов маршрута. Таким образом, студенты овладевают компетенциями системного моделирования [5] и грамотного обоснования выбранного пути решения. В результате обсуждения под руководством преподавателя они понимают, что в контексте решаемой задачи автомобиль можно представить материальной точкой в первом приближении. Моделирование динамики движения целесообразно осуществить в рамках законов равноускоренного движения [6-7]. Тогда базовая аксиоматика в случае отсутствия светофоров ($N_c=0$) на переезде может быть описана как

$$\Delta t_i = \frac{0.5t_p + 3.6L/V_{\max}}{60} + \Delta t_{II}, \quad (1)$$

где t_p – время разгона автомобиля, рассчитываемое по данным интернета о выбранном средстве передвижения. В случае наличия светофоров на переезде, соотношение (1) усложняется, и длительность движения на i -ом переезде оценивается как

$$\Delta t_i = N_c \frac{t_p + 3.6L/N_c V_{\max}}{60} + \Delta t_{II}. \quad (2)$$

Полное время в пути на маршруте определяется суммой

$$t = \sum_{i=1}^{N_{II}} \Delta t_i. \quad (3)$$

Для исследуемого графа (см. рис. 1) гексограмма сравнения представлена на рис. 2. На заключительном этапе студентам предлагается сформулировать результаты исследований в виде развернутых выводов с указанием используемых методов и моделей. В процессе совместной работы над принятием решения по выбору оптимального пути следования у обучающихся формируется способность к критическому анализу проблемной ситуации на

основе системного подхода, вырабатывается как собственная стратегия действий, так и обоснованное коллегиальное решение, а также навыки применения естественнонаучных знаний (фундаментальных законов физики), методов моделирования и математического анализа в профессиональной деятельности.

В заключение хотелось бы отметить, что разработка и отладка заданий для ситуативного способа обучения является деятельностью, требующей от преподавателя серьезных трудовых затрат, и очень длительный процесс. Кроме того, выполнение таких заданий потребует увеличения объема аудиторных занятий, поскольку протекает в непосредственном контакте коллективов исполнителей (студентов) с руководителем работ (преподавателем). Так как существующие тенденции в организации учебного процесса подразумевают неуклонное сокращение количества часов на проведение таких занятий, то в настоящий момент активное внедрение данных методик в обучение крайне затруднительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лузан, Е.Н. Кейс как образовательная технология / Е.Н. Лузан // Вестник БГУ. – 2012. – №1 (1). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/keys-kak-obrazovatel'naya-tehnologiya> (Дата обращения: 30.04.2024).

2. Андруник, А.П. Применение кейс-метода в образовательном процессе / А.П. Андруник, А.В. Бибики // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. – 2017. – №3 (75). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-keys-metoda-v-obrazovatel'nom-protssesse> (Дата обращения: 30.04.2024).

3. Габдулхакова, О.И. Роль кейс-метода в учебном процессе / О.И. Габдулхакова // Психология и педагогика: методика и проблемы практического применения. – 2010. – №12-1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-keys-metoda-v-uchebnom-protssesse> (Дата обращения: 30.04.2024).

4. Поскребышева, Т.А. Применение метода кейсов в обучении студентов иностранному языку в вузе // Современные проблемы науки и образования. – 2021. – № 3. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=30690> (Дата обращения: 30.04.2024).

5. Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е. Демин; под ред. В.И. Новосельцева. – Москва: Майор, 2006. – 592 с.

6. Физика. Лабораторный практикум. Часть 1 : учеб. пособие в 2-х частях / Н.Ю. Евсикова, Н.С. Камалова, В.И. Лисицын, Н.Н. Матвеев, В.В. Постников, В.В. Саушкин. – Воронеж: ВГЛТУ, 2018. – 196 с.

7. Физика : учеб. пособие для практ. занятий. Ч. 1 / В.В. Саушкин, Н.Н. Матвеев, В.И. Лисицын, И.П. Бирюкова, Н.Ю. Евсикова, Н.С. Камалова, Н.И. Коротких, Т.Л. Майорова, Н.А. Саврасова; ВГЛТУ. – Воронеж, 2019. – 122 с.

REFERENCES

1. Luzan, E.N. Case as an educational technology / E.N. Luzan // Bulletin of BSU. – 2012. – No. 1 (1). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/keys-kak-obrazovatel'naya-tehnologiya> (Accessed: 30.04.2024).

2. Andrunik, A.P. Application of the case method in the educational process / A.P. Andrunik, A.V. Bibik // Bulletin of the St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia. –

2017. – No. 3 (75). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-keys-metoda-v-obrazovatelnom-protse> (Accessed: 30.04.2024).

3. Gabdulkhakova, O.I. The role of the case method in the educational process / O.I. Gabdulkhakova // Psychology and pedagogy: methods and problems of practical application. – 2010. – No. 12-1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-keys-metoda-v-uchebnom-protse> (Accessed: 30.04.2024).

4. Poskrebysheva, T.A. Application of the case method in teaching students a foreign language at a university // Modern problems of science and education. – 2021. – No. 3. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=30690> (Accessed: 30.04.2024).

5. Theoretical foundations of systems analysis / V.I. Novoseltsev, B.V. Tarasov, V.K. Golikov, B.E. Demin; edited by V.I. Novoseltseva. – Moscow: Major, 2006. – 592 p.

6. Physics. Laboratory workshop. Part 1: textbook. manual in 2 parts / N.Yu. Evsikova, N.S. Kamalova, V.I. Lisitsyn, N.N. Matveev, V.V. Postnikov, V.V. Saushkin. – Voronezh: VGLTU, 2018. – 196 p.

7. Physics : textbook. manual for practical purposes classes. Part 1 / V.V. Saushkin, N.N. Matveev, V.I. Lisitsyn, I.P. Biryukova, N.Yu. Evsikova, N.S. Kamalova, N.I. Korotkikh, T.L. Mayorova, N.A. Savrasova; VGLTU. – Voronezh, 2019. – 122 p.

Научное издание

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Материалы Всероссийской научно-методической конференции

Воронеж, 17 апреля 2024 г.

Ответственный редактор Н.Ю. Евсикова

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано к изданию 07.10.2024. Объем данных 6,94 Мб
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»
ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8