

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ
В ПЛЁНОЧНЫХ БИОРЕАКТОРАХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
БИОТОПЛИВА НА ОСНОВЕ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ**

Шевцов А.А., Сердюкова Н.А., Зотов Р.Л.

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Воронеж, Россия*

**ENSURING TEMPERATURE STABILITY IN FILM BIOREACTORS
FOR THE PRODUCTION OF BIOFUELS BASED ON MICROALGAE**

Shevtsov A.A., Serdyukova N.A., Zotov R.L.

**Military Education and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky
and Y.A Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia**

Аннотация: В статье предложена конструкция биореактора с вращающимися трубками, использующая центробежные силы для стабилизации жидкостной плёнки и улучшения теплообмена. Эксперименты показали, что увеличение частоты вращения трубок повышает продуктивность биосинтеза хлореллы и уменьшает температурные колебания, что улучшает эффективность получения бионефти из микроводорослей.

Abstract: The article proposes the design of a bioreactor with rotating tubes, which uses centrifugal forces to stabilize the liquid film and improve heat exchange. Experiments have shown that increasing the frequency of tube rotation increases the productivity of chlorella biosynthesis and reduces temperature fluctuations, which improves the efficiency of obtaining biofuel from microalgae.

Ключевые слова: фотоавтотрофные микроорганизмы, микроводоросли, биотопливо, возобновляемые источники энергии, биореактор, бионефть.

Keywords: photoautotrophic microorganisms, microalgae, biofuels, renewable energy, bioreactor, bioneft.

Бурное развитие альтернативной энергетики привело к росту интереса к технологии гидротермального сжижения микроводорослей, как способу получения жидкого биотоплива – сырой бионефти. Данный метод предполагает нагревание водной суспензии биомассы до температур 455-600 °С при давлениях 10-30 МПа в течение 1-9 минут с применением катализатора [1-3]. Однако его внедрение сдерживается высокой стоимостью получения биомассы, энергоёмкостью процесса и необходимостью термостабильных реакторов.

Технико-экономические исследования показывают, что себестоимость производства бионефти на основе водорослевой биомассы до сих пор в 2-3 раза выше, чем у ископаемых аналогов [4, 5]. Тем не менее, усиливающееся давле-

ние экологических стандартов и интерес к устойчивым источникам энергии создают стимул для улучшения параметров биосинтеза микроводорослей, особенно в части обеспечения температурной и гидродинамической устойчивости в биореакторах.

В ряде работ, выполненных в Воронежском государственном университете инженерных технологий (ВГУИТ), предложены варианты конструкций плёночных биореакторов, использующих вращающиеся цилиндрические трубки с винтовыми спиралями на внутренних стенках [6-8]. Такие конфигурации способствуют формированию жидкостной плёнки, устойчивой к температурным флуктуациям, и улучшает теплообмен внутри реактора за счёт постоянного обновления граничного слоя суспензии. Однако возникающая в подобных условиях гидродинамическая неустойчивость приводит к перераспределению биомассы по высоте трубок, что нарушает однородность контакта плёнки с газовой смесью, содержащей воздух и диоксид углерода. Это, в свою очередь, снижает эффективность массопереноса и ограничивает прирост биомассы в условиях автотрофного биосинтеза.

Для минимизации подобных отклонений предлагается увеличить прижимное давление жидкой плёнки к внутренней поверхности трубок за счет интенсификации действия центробежной силы. Конструктивные особенности нового биореактора [9] состоят в том, что прозрачная вращающаяся рециркуляционная труба соединена зубчатой передачей с прозрачными трубками, которые имеют возможность вращения относительно оси симметрии. Это направлено на увеличение центробежной силы с целью создания дополнительного давления жидкой плёнки на стенки прозрачных трубок, что обеспечит стабильное удержание плёнки, как следствие равномерное её прогревание и увеличение контакта с газовой смесью.

Прозрачные трубки равномерно освещаются лампами накаливания, а внутренняя поверхность корпуса выполнена зеркальной для равномерного распределения светового потока. Дополнительно реализована система воздушного охлаждения, предотвращающая перегрев и обеспечивающая термодинамическое равновесие в зоне биосинтеза [9].

Ключевую роль в поддержании стабильности играет воздействие центробежной силы. Она обеспечивает прижатие плёнки к внутренней поверхности трубок, тем самым уменьшая её разрывы и колебания толщины, которые обычно возникают при температурных перепадах [10, 11].

Для оценки давления плёнки, прижимаемой центробежной силой, использовалась следующая модель (1):

$$P = \frac{\bar{F}}{S} = \frac{V \bar{\rho} \omega^2 r}{2\pi r h}, \quad (1)$$

где $\bar{F}$ – центробежная сила кг, V – объемный расход культуральной жидкости через пленкообразующее устройство, м³/с; $\bar{\rho}$ – плотность культуральной жид-

кости, кг/м^3 ; ω – угловая скорость (частота) вращения прозрачной трубки, с^{-1} ; r – радиус трубки (радиус вращения), м^3 ; S – площадь внутренней поверхности прозрачной трубки в рабочей зоне биореактора, м^2 ; h – высота прозрачной трубки в рабочей зоне биореактора, м .

Располагая результатами автотрофного биосинтеза в биореакторах пленочного типа [12, 13], а также объективными данными о влиянии центробежной силы на жидкостный слой, стекающий по внутренней поверхности цилиндрической трубы [13-15], на лабораторной установке были проведены экспериментальные исследования процесса культивирования микроводоросли хлореллы при температуре 32°C и варьировании следующих параметров:

- частота вращения трубок: $60\text{-}90 \text{ мин}^{-1}$,
- освещённость: $11,3\text{-}28,3 \text{ клк}$,
- концентрация CO_2 : $3\text{-}10 \%$,
- расход газа: $13,6\text{-}23,3 \text{ кг/ч}$,
- шаг спирали: $10\text{-}25 \text{ мм}$.

Целью исследований являлась количественная оценка влияния давления культуральной жидкости на внутреннюю поверхность вращающейся прозрачной трубки, вызванного действием центробежной силы. Результаты подтвердили: увеличение скорости вращения трубок до $80\text{-}90 \text{ мин}^{-1}$ приводит к росту давления плёнки на стенки, а также снижению локальных температурных перегревов за счёт более интенсивного перемешивания. Наивысшая продуктивность была достигнута при концентрации сухой биомассы $1,5\text{-}4,0 \text{ г/дм}^3$ (рис.1).

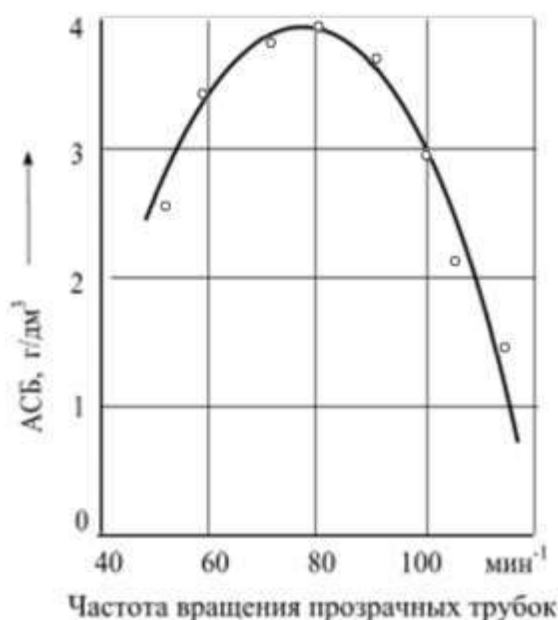


Рисунок 1 – Кривая роста биомассы хлореллы в зависимости от частоты вращения трубок

Таким образом, реализованный замкнутый цикл рециркуляции жидкости и газа, синхронное вращение плёночноформирующих элементов, а также освещение и охлаждение обеспечивают устойчивую работу биореактора даже при значительных температурных колебаниях.

Разработка высокотемпературных биореакторов, устойчивых к внутренним флуктуациям температуры и давления, имеет ключевое значение для промышленного масштабирования технологии получения бионефти из микроводорослей. Применение центробежных сил в конструкции плёночного биореактора позволило стабилизировать жидкостную плёнку, обеспечить равномерное освещение и теплообмен, а также увеличить производительность без потери качества биомассы.

Список литературы

1. Получение бионефти путем гидротермального сжижения влажной биомассы микроводорослей / М.С. Власкин, А.В. Григоренко, Н.И. Чернова [и др.] // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2018. – № 22-24(270-272). – С. 68-79. – DOI 10.15518/isjaee.2018.22-24.068-079.
2. Патент № 2794959 С1 Российская Федерация, Способ получения биотоплива: № 2022113096: заявл. 16.05.2022: опубл. 26.04.2023 / М.С. Власкин, К. Винод, А.И. Курбатова [и др.]; заявитель «Российский университет дружбы народов».
3. Патент № 2689325 С1 Российская Федерация, Установка для производства биотоплива: № 2018146523: заявл. 26.12.2018: опубл. 27.05.2019 / М.С. Котелев, М.С. Власкин, И.А. Тиунов [и др.]; заявитель «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина».
4. Рынок биотоплива и его взаимодействие с нефтепродуктами [Электронный ресурс] // REFRAT [сайт] [2025]. – URL: <https://refrat-oil.com/2024/09/07/biofuel> (дата обращения 14.08.2025).
5. Производство биотоплива. Будущее производства биотоплива: инновации и вызовы [Электронный ресурс] // Fastercapital [сайт] [2025]. – URL: <https://fastercapital.com/ru/content/Производство-биотоплива> (дата обращения 12.08.2025).
6. Патент № 2586534 С1 Российская Федерация, Аппарат для культивирования автотрофных микроорганизмов: № 2014153346/10: заявл. 29.12.2014: опубл. 10.06.2016 / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, Е.А. Шабунина; заявитель «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО "ВГУИТ").
7. Современные тенденции совершенствования конструкций пленочных аппаратов для фотоавтотрофного биосинтеза светозависимых микроорганизмов / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, А.В. Пономарев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. – № 3(69). – С. 68-76. – DOI 10.20914/2310-1202-2016-3-68-76.
8. Биореактор с применением импеллерных мешалок для культивирования биомассы микроводорослей / Л.И. Лыткина, Е.С. Шенцова, Д.В. Коптев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2019. – Т. 81, № 1(79). – С. 32-35. – DOI 10.20914/2310-1202-2019-1-32-35.
9. Патент № 2839375 С1 Российская Федерация. Биореактор для культиви-

рования автотрофных микроорганизмов: заявл. 25.03.2024: опубл. 30.04.2025 / А.А. Шевцов, Н.А. Сердюкова, Р.Л. Зотов; заявитель «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

10. Бурмистрова О.А. Равновесные формы жидкости на внутренней поверхности вращающегося цилиндра и их устойчивость / О.А. Бурмистрова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 5-14. – DOI 10.7242/1999-6691/2018.11.1.1.

11. Минухин А.А. Гидродинамика закрученной пленки жидкости, стекающей по внутренней поверхности вертикальной трубы / А.А. Минухин, И.П. Гальчак // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2022. – № 1. – С. 143-147.

12. Массообмен в проточном биореакторе с рециркуляцией жидкости / Н.А. Войнов, О.П. Жукова, О.В. Курганский [и др.] // Химия растительного сырья. – 2014. – № 3. – С. 241-246.

13. Schediwy K. Microalgal kinetics / K. Schediwy, A. Trautmann, C. Posten // Engineering in Life Sciences. – 2019. – Vol. 19(12). – pp. 830–843. DOI: 10.1002/elsc.201900107

14. Mink A. Comprehensive Computational Model for Coupled Fluid Flow, Mass Transfer, and Light Supply in Tubular Photobioreactors Equipped with Glass Sponges / A. Mink, K. Schediwy, C. Posten [et al] // Energies. – 2022. – Vol. 15(20), - p. 7671. DOI: 10.3390/en15207671

15. Математическое моделирование процесса культивирования светозависимых микроорганизмов в пленочном аппарате с противоточным движением фаз / А.А. Шевцов, Л.И. Лыткина, С.Т. Антипов [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 344. – DOI 10.7868/S004035711603012X.

References

1. Production of bio-oil by hydrothermal liquefaction of wet microalgae biomass / M.S. Vlaskin, A.V. Grigorenko, N.I. Chernova [et al.] // International scientific journal Alternative Energy and Ecology. – 2018. – № 22-24 (270-272). – pp. 68-79. – DOI 10.15518/isjaee.2018.22-24.068-079.

2. Patent № 2794959 C1 Russian Federation. Method for producing biofuel: № 2022113096: declared. 05.16.2022: published. 26.04.2023 / M.S. Vlaskin, K. Vinod, A.I. Kurbatova [et al.]; applicant «Peoples' Friendship University of Russia».

3. Patent № 2689325 C1 Russian Federation. Biofuel production unit: № 2018146523: filed 26.12.2018: published 27.05.2019 / M.S. Kotelev, M.S. Vlaskin, I.A. Tiunov [et al.]; applicant «Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)»

4. The Biofuel Market and Its Interaction with Petroleum Products [Electronic resource] // REFRAT [website] [2025]. – URL: <https://refrat-oil.com/2024/09/07/biofuel> (date of access 08/14/2025).

5. Biofuel Production. The Future of Biofuel Production: Innovations and Challenges [Electronic resource] // Fastercapital [website] [2025]. – URL:

<https://fastercapital.com/ru/content/Прослушать-биотоплива> (date of access 08/12/2025).

6. Patent № 2586534 C1 Russian Federation. Apparatus for culturing autotrophic microorganisms: No. 2014153346/10: declared 29.12.2014: published 10.06.2016 / A.A. Shevtsov, A.V. Drannikov, E.A. Shabunina; applicant «Voronezh State University of Engineering Technologies».

7. Current trends in improving the designs of film apparatuses for photoautotrophic biosynthesis of light-dependent microorganisms / A.A. Shevtsov, A.V. Drannikov, A.V. Ponomarev [et al.] // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2016. – №3 (69). – pp. 68-76. – DOI 10.20914/2310-1202-2016-3-68-76.

8.. Bioreactor using impeller mixers for cultivating microalgae biomass / L.I. Lytkina, E.S. Shentsova, D.V. Koptev [et al.] // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2019. – Vol. 81, № 1(79). – pp. 32-35. – DOI 10.20914/2310-1202-2019-1-32-35.

9. Patent № 2839375 C1 Russian Federation. Bioreactor for culturing autotrophic microorganisms: declared 25.03.2024: published 30.04.2025 / A.A. Shevtsov, N.A. Serdyukova, R.L. Zotov; applicant «Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin».

10. Burmistrova O.A. Equilibrium forms of liquid on the inner surface of a rotating cylinder and their stability / O.A. Burmistrova // Computational Continuous Media Mechanics. – 2018. – Vol. 11, № 1. – pp. 5-14. – DOI 10.7242/1999-6691/2018.11.1.1.

11. Minukhin A.A. Hydrodynamics of a swirling liquid film flowing down the inner surface of a vertical pipe / A.A. Minukhin, I.P. Galchak // Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex – healthy food products. – 2022. – № 1. – pp. 143-147.

12. Mass transfer in a flow-through bioreactor with liquid recirculation / N.A. Voynov, O.P. Zhukova, O.V. Kurgansky [et al.] // Chemistry of plant raw materials. – 2014. – № 3. – pp. 241-246.

13. Schediwy K. Microalgal kinetics / K. Schediwy, A. Trautmann, C. Posten // Engineering in Life Sciences. – 2019. – Vol. 19(12). – pp. 830–843. DOI: 10.1002/elsc.201900107

14. Mink A. Comprehensive Computational Model for Coupled Fluid Flow, Mass Transfer, and Light Supply in Tubular Photobioreactors Equipped with Glass Sponges / A. Mink, K. Schediwy, C. Posten [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15(20), - r. 7671. DOI: 10.3390/en15207671

15. Mathematical modeling of the process of culturing light-dependent microorganisms in a film apparatus with countercurrent phase movement / A.A. Shevtsov, L.I. Lytkina, S.T. Antipov [et al.] // Theoretical Foundations of Chemical Technology. – 2016. – Vol. 50, № 3. – pp. 344. – DOI 10.7868/S004035711603012X.