

УДК 579.81.082.26.043:574.55

**КРИТИЧЕСКАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ СУСПЕНЗИИ
И ПРОДУКТИВНОСТЬ НАКОПИТЕЛЬНОЙ КУЛЬТУРЫ
ARTHROSPIRA (SPIRULINA) PLATENSIS
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СВЕТОВЫХ УСЛОВИЯХ**

© 2025 г. Р. Г. Геворгиз^{1,2}, Б. Р. Шарифуллин^{2,3},
И. В. Наумов^{2,3}, С. Н. Железнова^{1,2}

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

³Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Российская Федерация

E-mail: r.gevorgiz@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.06.2024; после доработки 31.07.2024;
принята к публикации 25.12.2024.

Представлены результаты экспериментального исследования накопительных культур *Arthrospira (Spirulina) platensis* в условиях критической интенсивности закрученных потоков при различной величине рабочего слоя (оптического пути). Показано: несмотря на повышение интенсивности вихревого перемешивания в 10 раз, при увеличении рабочего слоя в 3 раза продуктивность культуры уменьшалась в 2 раза. Отмечено, что для фотосинтезирующих микроорганизмов ведущим фактором, определяющим продуктивность культуры, является пространственная облучённость внутри суспензии клеток (рабочий слой), но с учётом интенсивности перемешивания суспензии. Экспериментально продемонстрированы условия культивирования фотосинтезирующих клеток, при которых рабочий слой отличается в 2 раза, но продуктивность культуры при этом остаётся неизменной.

Ключевые слова: вихревое перемешивание, спирулина, фотобиореактор

На продуктивность культур фотосинтезирующих микроорганизмов влияет множество факторов, однако при проектировании промышленных фотобиореакторов (далее — ФБР) ключевыми параметрами являются оптический путь (рабочий слой) и интенсивность перемешивания суспензии клеток. Именно эти два параметра оказывают существенное влияние на производительность системы культивирования, а также определяют конструктивные особенности ФБР и режимы его работы. Экспериментально доказано, что одним из наиболее перспективных методов перемешивания суспензии клеток в промышленной микробиологии является генерация вихревого движения суспензии по типу «торнадо», то есть создание замкнутых закрученных квазистационарных потоков внутри рабочего объёма ФБР [Геворгиз и др., 2021; Мертвецов и др., 2002; Патент 1779690 А1 SU, 1992; Патент 2099413 С1, 1992; Naumov et al., 2023a; Patent EP 1120460 B1, 1998; Patent EP 27446382 A1, 2011]. Вихревой способ позволяет эффективно перемешивать культуру, обеспечивая одновременно трёхмерное циркуляционное и меридиональное движение

культуральной среды, но при этом достаточно мягко — без гидроударов, турбулентности, кавитации, повышенных сдвиговых напряжений и механического воздействия на клетки. Наибольшая эффективность перемешивания сформированного в суспензии вихря достигается, когда радиус вихревого ФБР и рабочий слой равны [Naumov et al., 2023b]. При таких условиях обеспечивается полная меридиональная циркуляция среды по всему рабочему объёму, при этом потери на вязкое трение о неподвижные стенки реактора малы. Между тем фототрофы, в отличие от гетеротрофных микроорганизмов, необходимо обеспечить энергией света во всех слоях рабочего объёма, поэтому промышленные ФБР всегда проектируют с малой величиной рабочего слоя [Штоль и др., 1976]. Несмотря на то, что уже опубликовано множество работ, посвящённых изучению влияния облучённости и интенсивности перемешивания на продуктивность фотосинтезирующих клеток [Bitog et al., 2014; Wang, You, 2013; Ye et al., 2018a, b; Xu et al., 2020], вопрос о повышении урожая в оптически плотных культурах путём увеличения интенсивности закрутки и, как следствие, скорости закрученного потока остаётся открытым.

Цель данной работы — исследовать накопительные культуры низших фототрофов в условиях критической интенсивности закрученных потоков при различной величине рабочего слоя (оптической толщине культуры).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на базе лаборатории перспективных энергоэффективных технологий Новосибирского государственного университета (Новосибирск). Изучали альгологически чистую культуру цианобактерий *Arthrospira (Spirulina) platensis* (Nordstedt) Gomont (штамм IBSS-31), полученную из коллекции культур микроводорослей и цианобактерий в ЦКП «Коллекция гидробионтов Мирового океана» ФИЦ ИнБЮМ (Севастополь). Для интенсивного культивирования цианобактерий использовали питательную среду Заррука [Zarrouk, 1966] следующего состава (г·л⁻¹): NaHCO₃ — 16,8; NaNO₃ — 2,5; KH₂PO₄ × 2H₂O — 0,66; K₂SO₄ — 1,0; NaCl — 1,0; Na₂EDTA — 0,08; FeSO₄ × 7H₂O — 0,01; CaCl₂ — 0,04; MgSO₄ × 7H₂O — 0,2; H₃BO₃ — 2,86 × 10⁻³; MnCl₂ × 4H₂O — 1,81 × 10⁻³; ZnSO₄ × 7H₂O — 0,222 × 10⁻³; CuSO₄ × 5H₂O — 0,079 × 10⁻³; MoO₃ — 0,015 × 10⁻³; NH₄VO₃ — 0,02296 × 10⁻³; Co(NO₃)₂ × 6H₂O — 0,04398 × 10⁻³; K₂Cr₂(SO₄)₄ × 24H₂O — 0,0960 × 10⁻³; NiSO₄ × 7H₂O — 0,04785 × 10⁻³; Na₂WO₄ × 2H₂O — 0,01794 × 10⁻³; Ti₂(SO₄)₃ — 0,0960 × 10⁻³. Питательную среду готовили на дистиллированной воде. Для поддержания постоянного уровня pH (8,4) в культуру добавляли CO₂ из баллона посредством pH-контроллера.

Все работы проводили с адаптированной к условиям эксперимента культурой в двух ФБР вихревого типа. Конструкция ФБР-1 представляла собой цилиндрический контейнер с погруженным вращающимся диском радиуса R₁ = 145 мм. Вращающийся диск генерировал внутри суспензии закрученные потоки, которые позволяли исключить застойные зоны в рабочем объёме. Для генерации вихревого движения у ФБР-2 над суспензией создавался закрученный поток воздуха путём вращения лопаточного колеса (активатора). В результате образующийся над суспензией вихрь за счёт трения воздуха о поверхность раздела фаз и разницы давления между периферией и центром газовой вихря вовлекал суспензию клеток на границе раздела в тангенциальное движение и генерировал во всём рабочем объёме закрученные меридиональные потоки, восходящие вблизи оси и нисходящие на периферии реактора [Naumov et al., 2023b]. Для стабилизации поверхности раздела фаз в ФБР-2 использовали свободно плавающую шайбу (рис. 1). Радиус шайбы R₂ = 76 мм, радиус отверстия в шайбе r₂ = 16 мм. Скорость вращения шайбы у ФБР-1 и активатора у ФБР-2 на протяжении накопительного культивирования была постоянной и определяла интенсивность перемешивания культуры.

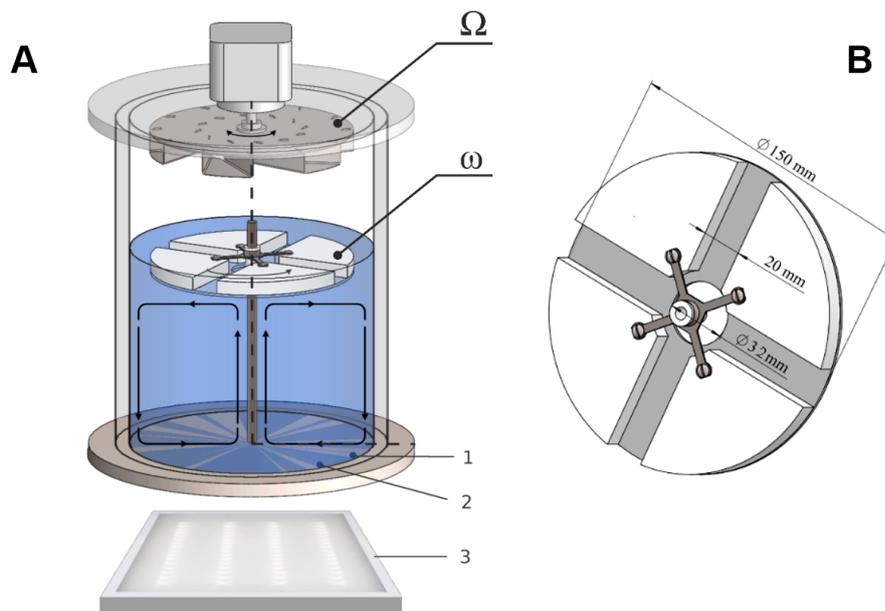


Рис. 1. Схема газовихревого биореактора (А); плоская шайба (В). На схеме: 1 — положение датчика рН; 2 — точка ввода CO_2 в суспензию; 3 — источник излучения

Fig. 1. Schematic diagram of gas-vortex bioreactor (A); flat washer (B). In the diagram: 1, pH sensor position; 2, point of CO_2 injection into the suspension; 3, radiation source

Исследования проводили при постоянной температуре и постоянном круглосуточном освещении. В качестве источника освещения использовали белые светодиоды CRI90 3000К, которые во всех экспериментах на рабочей поверхности ФБР создавали одинаковую облучённость — $20 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$. Облучённость рассчитывали, используя показания люксметра Ю-116, спектр относительной видности и спектральные характеристики светодиодов, предоставленные производителем [Геворгиз, Малахов, 2018]. В эксперименте № 1 в ФБР-1 рабочий слой h_1 составлял 150 мм (объём суспензии $V_1 = 39,6$ л), а частота вращения диска — 3,4 Гц ($\omega_1 = 204 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$). Максимальная (критическая) скорость движения суспензии в закрученных потоках была подобрана таким образом, чтобы граница раздела фаз не колебалась и не деформировалась, то есть чтобы рабочий слой по всем направлениям оставался неизменным. В условиях эксперимента № 1 значение окружной скорости движения v_1 составляло $3,10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Условия эксперимента № 2 были аналогичны, за исключением того, что рабочий слой был уменьшен в 3 раза, до $h_2 = 50$ мм ($V_2 = 13,2$ л), а частота вращения диска — в 10 раз, до 0,34 Гц ($\omega_2 = 20,4 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$), при этом окружная скорость v_2 составляла $0,31 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. В эксперименте № 3 в ФБР-2 рабочий слой h_3 составлял 105 мм ($V_3 = 2,7$ л), частота вращения активатора — $1200 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$, частота вращения шайбы — 0,88 Гц ($\omega_3 = 52,8 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$). Максимальное значение окружной скорости v_3 при таком режиме — $0,42 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Условия эксперимента № 4 были аналогичны условиям эксперимента № 3, за исключением того, что рабочий слой h_4 составлял 50 мм ($V_4 = 1,27$ л), а частота вращения активатора была уменьшена до 15 Гц ($900 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$); как следствие, частота вращения шайбы снизилась до 0,7 Гц ($\omega_4 = 42 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$). Максимальное значение окружной скорости v_4 при таком режиме составило $0,33 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

В течение всего эксперимента в культуре ежедневно определяли биомассу путём измерения ослабления светового потока на длине волны 750 нм слоем суспензии клеток с помощью концентрационного фотоколориметра КФК-2 (T_{750} , %; кювета 5 мм) с последующим переходом к оптической плотности $D_{750} = -\lg(T_{750}/100)$ и к биомассе $B = D_{750} \times 0,85 \text{ (г}\cdot\text{с}\cdot\text{м}\cdot\text{л}^{-1})$ [Геворгиз и др., 2005]. Среднеквадратическое отклонение измерений плотности культуры

во всех экспериментах не превышало $0,02 \text{ г с. м. л}^{-1}$. Максимальную продуктивность культуры рассчитывали для линейного участка накопительной кривой, используя следующее выражение:

$$B(t) = P_m \times (t - t_L) + B_L,$$

где B — биомасса, г с. м. л^{-1} ;

P_m — максимальная продуктивность, $\text{г с. м. л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$;

t — время, сут;

t_L — начальный момент времени линейного участка накопительной кривой, сут;

B_L — биомасса в момент времени t_L .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В оптически плотных культурах из-за темнового дыхания и расходов на поддержание структуры всегда наблюдается снижение продуктивности [Авсиян, Лелеков, 2020; Torzillo et al., 1991]. Ввиду двухстадийности процесса фотосинтеза можно предположить, что увеличение интенсивности перемешивания уменьшит время нахождения клеток в слоях с облучённостью ниже компенсационного пункта фотосинтеза, что приведёт к росту продуктивности. Это позволит повысить урожай в промышленных ФБР с большим рабочим слоем.

Во многих экспериментальных исследованиях показано, что световые условия культивирования являются ведущим фактором, определяющим продуктивность культуры [Авсиян, Лелеков, 2020; Лелеков и др., 2020; Тренкеншу и др., 1981], причём важна не только поверхностная облучённость, но и распределение энергии излучения внутри суспензии клеток [Новикова, 2017; Qiang et al., 1998], что в значительной степени определяется текущей плотностью культуры [Richmond, 2000]. Для светолимитированных культур величина продуктивности, как правило, зависит от облучённости линейно; например, для *A. platensis* линейность отмечена при $5\text{--}30 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ [Лелеков и др., 2020]. Между тем для интенсивно перемешиваемых культур эта закономерность наблюдается не всегда. Так, по результатам наших экспериментов (рис. 2, 3) можно видеть, что интенсивность перемешивания действительно увеличивает продуктивность культур, но не линейно. Следовательно, в исследованиях влияния световых условий на продуктивность необходимо учитывать и интенсивность перемешивания культуры.

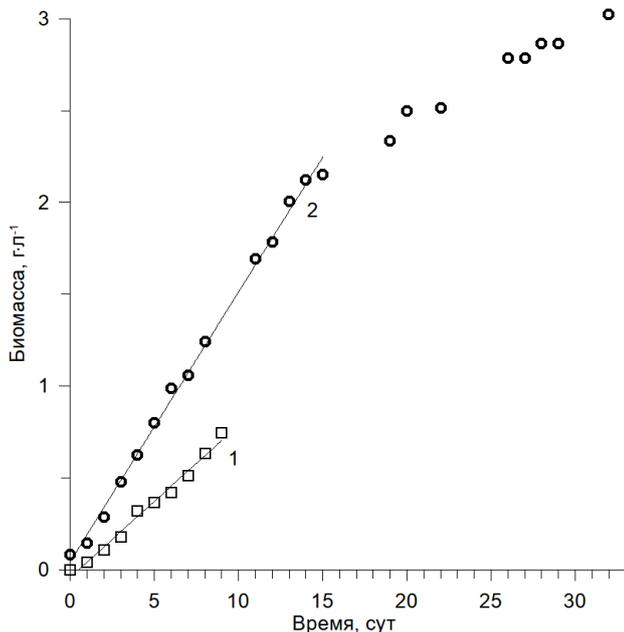


Рис. 2. Динамика плотности накопительной культуры *Arthrospira (Spirulina) platensis* при различной величине рабочего слоя и интенсивности вихревого перемешивания. Среднеквадратическое отклонение измерений не более 0,02. 1 — эксперимент № 1: $h_1 = 150 \text{ мм}$; $\omega_1 = 204 \text{ об. мин}^{-1}$; $v_1 = 3,10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; $B_1 = 0,08 \times t - 0,04$. 2 — эксперимент № 2: $h_2 = 50 \text{ мм}$; $\omega_2 = 20,4 \text{ об. мин}^{-1}$; $v_2 = 0,31 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; $B_2 = 0,15 \times t + 0,05$

Fig. 2. Density dynamics of *Arthrospira (Spirulina) platensis* batch culture with various working layer size and vortex mixing intensity. The standard deviation of measurements does not exceed 0.02. 1, experiment No. 1: $h_1 = 150 \text{ mm}$; $\omega_1 = 204 \text{ rpm}$; $v_1 = 3.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $B_1 = 0.08 \times t - 0.04$. 2, experiment No. 2: $h_2 = 50 \text{ mm}$; $\omega_2 = 20.4 \text{ rpm}$; $v_2 = 0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $B_2 = 0.15 \times t + 0.05$

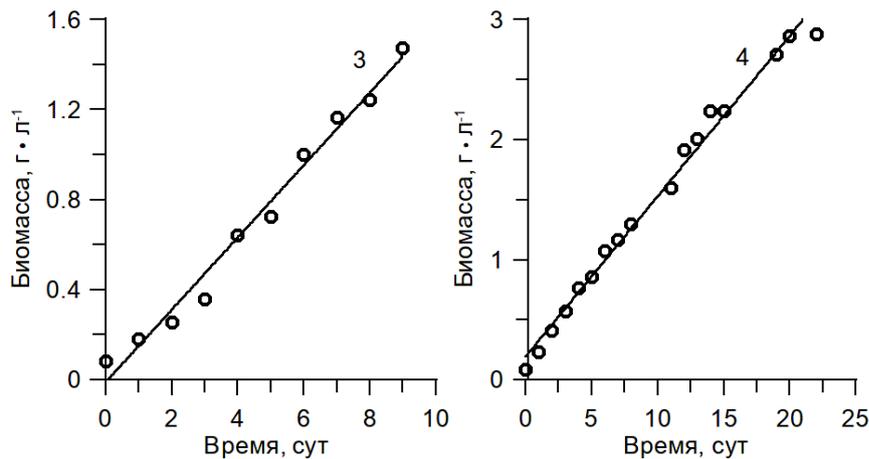


Рис. 3. Динамика плотности накопительной культуры *Arthrospira (Spirulina) platensis* при различной величине рабочего слоя и интенсивности вихревого перемешивания. Среднеквадратическое отклонение измерений не более 0,02. 3 — эксперимент № 3: $h_3 = 105$ мм; $\omega_3 = 52,8$ об·мин⁻¹; $v_3 = 0,42$ м·с⁻¹; $B_3 = 0,16 \times t - 0,01$. 4 — эксперимент № 4: $h_4 = 50$ мм; $\omega_4 = 42,8$ об·мин⁻¹; $v_4 = 0,33$ м·с⁻¹; $B_4 = 0,15 \times t + 0,1$. Продуктивность культур (угол наклона) *A. (S.) platensis* одинакова в условиях различного светового обеспечения

Fig. 3. Density dynamics of *Arthrospira (Spirulina) platensis* batch culture with various working layer size and vortex mixing intensity. The standard deviation of measurements does not exceed 0.02. 3, experiment No. 3: $h_3 = 105$ mm; $\omega_3 = 52.8$ rpm; $v_3 = 0.42$ m·s⁻¹; $B_3 = 0.08 \times t - 0.04$. 4, experiment No. 4: $h_4 = 50$ mm; $\omega_4 = 42.8$ rpm; $v_4 = 0.33$ m·s⁻¹; $B_4 = 0.15 \times t + 0.05$. The productivity of *A. (S.) platensis* culture (angle of inclination) is similar under different light conditions

Интенсивность перемешивания суспензии клеток всегда ограничена либо конструкцией ФБР, либо видоспецифическими особенностями культивируемых клеток. В частности, в ФБР плоско-параллельного типа при некоторой критической величине барботаж воздуха образуется обильная пена, препятствующая процессу культивирования [Штоль и др., 1976; Kubar et al., 2022]. В ФБР типа «бассейн» при некоторой критической скорости движения механической мешалки из-за локальных перепадов давления и повышения температуры культивируемые клетки погибают [Mazzuca Sobczuk et al., 2006]. Клетки микроводорослей разрушаются при использовании насосов [Jaouen et al., 1999], фильтров [Vandanjon et al., 1999] и разбрызгивателей [García Camacho et al., 2000]. Кроме того, они могут быть повреждены пузырьками газа и высокой турбулентностью культуральной среды [Silva et al., 1987]. Поэтому на практике для культивирования фотосинтезирующих микроорганизмов перемешивание культуры осуществляют недостаточно активно, при этом в ФБР большого объёма ведущим фактором, определяющим продуктивность, практически всегда является пространственная облучённость (рабочий слой). По нашим данным, несмотря на предельную интенсивность вихревого перемешивания суспензии ($v_1 = 3,097$ м·с⁻¹) в слое $h_1 = 150$ мм, продуктивность в накопительной культуре была в 2 раз ниже (см. рис. 2) в сравнении с таковой для меньшего рабочего слоя ($h_2 = 50$ мм, $3h_2 = h_1$) и малой интенсивности перемешивания ($v_2 = 0,3097$ м·с⁻¹, $10v_2 = v_1$). Заметим, что при увеличении рабочего слоя в 3 раза продуктивность возросла не в 3 раза, как можно ожидать для светолимитированной культуры, а в 2 раза ($P_1 = 0,08$ г с. м. · л⁻¹ · сут⁻¹, $P_2 = 0,15$ г с. м. · л⁻¹ · сут⁻¹). Обусловлено это именно увеличением интенсивности перемешивания суспензии в 10 раз.

При повышении интенсивности перемешивания культуры и изменении рабочего слоя можно установить такой режим культивирования, при котором увеличение рабочего слоя в 2 раза не изменит продуктивность культуры. На рис. 3 представлены две накопительные кривые, которые характеризуются практически одинаковой продуктивностью ($P_3 = 0,16$ г с. м. · л⁻¹ · сут⁻¹,

$P_4 = 0,15 \text{ г с. м.} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$), хотя рабочий слой культур отличается в 2 раза ($h_3 = 105 \text{ мм}$, $h_4 = 50 \text{ мм}$, $h_3 = 2h_4$). Следовательно, при культивировании микроводорослей и цианобактерий в промышленных ФБР для получения максимального урожая с учётом затрат на перемешивание единицы объёма суспензии необходимо устанавливать максимально допустимую интенсивность перемешивания культуры и увеличивать рабочий слой до некоторого предельного значения, при котором продуктивность культуры не снижается. Такой подход однозначно позволит повысить урожай, особенно при промышленном выращивании фотосинтезирующих микроорганизмов в условиях естественного освещения (в частности, в районах с низким притоком солнечной радиации), а также при выращивании в осенне-зимний период [Чекушкин и др., 2022].

Закключение. Наряду со световыми условиями, важным фактором, определяющим продуктивность культуры микроводорослей и цианобактерий, является её перемешивание. Этот фактор особенно проявляет себя при увеличении рабочего объёма и рабочего слоя суспензии клеток в промышленных фотобиореакторах. Повышение интенсивности перемешивания культуры до некоторых критических значений позволит достичь максимальной величины урожая при фиксированных значениях облучённости. На сегодняшний день теоретические представления о перемешивании фотосинтезирующих клеток в культуре развиты слабо, поэтому для управления процессами роста и для поиска оптимальных решений необходимо построение моделей субстратзависимого роста в условиях воздействия двух факторов — перемешивания и светового обеспечения клеток. Это достаточно сложная междисциплинарная задача, которая требует введения новых количественных критериев, позволяющих сравнивать разные способы перемешивания в различных конструкциях фотобиореакторов, а также формально оценивать интенсивность перемешивания суспензии клеток в рабочем объёме.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (№ гос. регистрации 124022400152-1), а также при поддержке РНФ, грант № 24-19-00233 «Интенсификация перемешивания в вихревых реакторах для био-, химических и энергетических технологий» (<https://rscf.ru/project/24-19-00233/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авсиян А. Л., Лелеков А. С. Зависимость удельной скорости эндогенного расхода и валовой продуктивности культуры микроводорослей от облучённости // *Вопросы современной альгологии*. 2020. № 1 (22). С. 8–16. [Avsiyan A. L., Lelekov A. S. Dependence of microalgae culture specific endogenous loss rate and gross productivity on irradiance. *Voprosy sovremennoi al'gologii*, 2020, no. 1 (22), pp. 8–16. (in Russ.)]. [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2020-1\(22\)-8-16](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2020-1(22)-8-16)
2. Геворгиз Р. Г., Алисиевич А. В., Шматок М. Г. Оценка биомассы *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl. по оптической плотности культуры // *Экология моря*. 2005. Вып. 70. С. 96–106. [Gevorgiz R. G., Alisieovich A. V., Shmatok M. G. Estimation of biomass of *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl with use of optical density of culture. *Ekologiya morya*, 2005, iss. 70, pp. 96–106. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4711>
3. Геворгиз Р. Г., Малахов А. С. *Пересчёт величины освещённости фотобиореактора в величину облучённости* : учебно-методическое пособие / РАН, Институт морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского. Севастополь, 2018. 60 с. [Gevorgiz R. G., Malakhov A. S. *Conversion of the Illumination Quantity of Photobioreactor into the Irradiance Quantity* : educational methodology manual / RAS, Kovalevsky Institute of Marine Biological Research. Sevastopol, 2018, 60 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/2068>
4. Геворгиз Р. Г., Уваров И. П., Репков А. П., Железнова С. Н. Вихревое перемешивание культур микроводорослей // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2021. Т. 6, № 4.

- C. 559–563. [Gevorgiz R. G., Uvarov I. P., Repkov A. P., Zheleznova S. N. Vortex mixing of microalgae cultures. *Aktual'nye voprosy biologicheskoi fiziki i khimii*, 2021, vol. 6, no. 4, pp. 559–563. (in Russ.)]. <https://elibrary.ru/ewsafq>
5. Лелеков А. С., Ключкова В. С., Гаджи А. В. Максимальная продуктивность накопительной культуры *Porphyridium purpureum* и *Arthrospira platensis* при различной освещённости // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2020. Т. 5, № 2. С. 253–260. [Lelekov A. S., Klochkova V. S., Gadzhi A. V. Maximum productivity of *Porphyridium purpureum* and *Arthrospira platensis* batch culture in different light conditions. *Aktual'nye voprosy biologicheskoi fiziki i khimii*, 2020, vol. 5, no. 2, pp. 253–260. (in Russ.)]. <https://elibrary.ru/gdkref>
 6. Мертвецов Н. П., Рамазанов Ю. А., Репков А. П., Дударев А. Н., Кислых В. И. *Газовихревые биореакторы «БИОК»: использование в современной биотехнологии*. Новосибирск : Наука, 2002. 118 с. [Mertvetsov N. P., Ramazanov Yu. A., Repkov A. P., Dudarev A. N., Kislykh V. I. *Gazovikhrevye bioreaktory "BIOK": ispol'zovanie v sovremennoi biotekhnologii*. Novosibirsk : Nauka, 2002, 118 p. (in Russ.)]. <https://elibrary.ru/ebifjn>
 7. Новикова Т. М. Влияние средней поверхностной освещённости на ростовые характеристики *Tetraselmis viridis* // *Вопросы современной альгологии*. 2017. № 1 (13). 5 с. [Novikova T. M. Effect of average surface irradiance on growth characteristics of *Tetraselmis viridis*. *Voprosy sovremennoi al'gologii*, 2017, no. 1 (13), 5 p. (in Russ.)]. <https://elibrary.ru/zcdlnp>
 8. Патент 1779690 А1 SU. МПК С12М 1/04. *Аппарат для культивирования клеток тканей или микроорганизмов* / Бадаев Б. Н., Воробьёв И. Д., Кислых В. И., Харченко В. А., Репков А. П. ; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский институт молекулярной биологии – № 4700908/13 ; заявл. 06.06.89 ; опубл. 07.12.92. Бюл. № 45. [Patent 1779690 A1 SU. МПК С12М 1/04. *Apparatus for Cultivation of Cells of Tissues or Microorganisms* / Badaev B. N., Vorob'ev I. D., Kislykh V. I., Kharchenko V. A., Repkov A. P. ; zayavitel' Vsesoyuznyi nauchno-issledovatel'skii institut molekulyarnoi biologii – no. 4700908/13 ; zayavl. 06.06.89 ; opubl. 07.12.92. Byul. no. 45]. <https://patents.google.com/patent/RU1779690C/en>
 9. Патент 2099413 С1 Российская Федерация. МПК С12М 1/04 (1995.01), С12М 3/00 (1995.01). *Аппарат для суспензионного культивирования клеток тканей или микроорганизмов* / Кислых В. И., Репков А. П., Рамазанов Ю. А., Воробьёв И. Д. ; заявитель Кислых В. И. – № 5043856/13, заявл. 15.04.1992 ; опубл. 20.12.1997. [Patent 2099413 C1 Russian Federation. МПК С12М 1/04 (1995.01), С12М 3/00 (1995.01). *Apparatus for Suspension Cultivation of Tissue Cells or Microorganisms* / Kislykh V. I., Repkov A. P. Ramazanov Yu. A., Vorob'ev I. D. ; zayavitel' Kislykh V. I. – no. 5043856/13, zayavl. 15.04.1992 ; opubl. 20.12.1997]. <https://patents.google.com/patent/RU2099413C1/en>
 10. Тренкеншу Р. П., Беянин В. Н., Сидько Ф. Я. *Модель светозависимого роста морских микроводорослей (с учётом фотоингибирования)*. Красноярск : ИФСО, 1981. 63 с. (Препринт № ИФСО-18Б). [Trenkenshu R. P., Belyanin V. N., Sidko F. Ya. *Model' svetozavisimogo rosta morskikh mikrovodoroslei (s uchetom fotoingibirovaniya)*. Krasnoyarsk : IFSO, 1981, 63 p. (Preprint no. IFSO-18B). (in Russ.)]
 11. Чекушкин А. А., Авсиян А. Л., Лелеков А. С. Продуктивность культуры *Arthrospira platensis* Gomont 1892 в условиях естественного освещения // *Труды Карадагской научной станции имени Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН*. 2022. № 4 (24). С. 33–44. [Chekushkin A. A., Avsiyan A. L., Lelekov A. S. Productivity of *Arthrospira platensis* Gomont 1892 culture under natural light conditions. *Trudy Karadagskoi nauchnoi stantsii imeni T. I. Vyazemskogo – prirodnogo zapovednika RAN*, 2022, no. 4 (24), pp. 33–44. (in Russ.)]. <https://elibrary.ru/oyfgop>
 12. Штоль А. А., Мельников Е. С., Ковров Б. Г. *Расчёт и конструирование культиваторов для одноклеточных водорослей*. Красноярск, 1976. 96 с. [Shtol' A. A., Mel'nikov E. S., Kovrov B. G. *Raschet i konstruirovaniye kul'tivatorov dlya odnokletochnykh vodoroslei*. Krasnoyarsk, 1976, 96 p. (in Russ.)]
 13. Bitog J. P. P., Lee I.-B., Oh H.-M., Hong S.-W., Seo I.-H., Kwon K.-S. Optimised hydrodynamic parameters for the design of photobioreactors

- using computational fluid dynamics and experimental validation. *Biosystems Engineering*, 2014, vol. 122, pp. 42–61. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.03.006>
14. García Camacho F., Contreras Gómez A., Mazzuca Sobczuk T., Molina Grima E. Effects of mechanical and hydrodynamic stress in agitated, sparged cultures of *Porphyridium cruentum*. *Process Biochemistry*, 2000, vol. 35, iss. 9, pp. 1045–1050. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(00\)00138-2](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(00)00138-2)
 15. Jaouen P., Vandanjon L., Quéméneur F. The shear stress of microalgal cell suspensions (*Tetraselmis suecica*) in tangential flow filtration systems: The role of pumps. *Bioresource Technology*, 1999, vol. 68, iss. 2, pp. 149–154. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00144-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00144-8)
 16. Kubar A. A., Ali A., Kumar S., Huo S., Ullah M. W., Alabbosh K. F. S., Ikram M., Cheng J. Dynamic foam characteristics during cultivation of *Arthrospira platensis*. *Bioengineering*, 2022, vol. 9, iss. 6, art. no. 257 (11 p.). <https://doi.org/10.3390/bioengineering9060257>
 17. Mazzuca Sobczuk T., García Camacho F., Molina Grima E., Chisti Y. Effects of agitation on the microalgae *Phaeodactylum tricoratum* and *Porphyridium cruentum*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2006, vol. 28, iss. 4, pp. 243–250. <https://doi.org/10.1007/s00449-005-0030-3>
 18. Naumov I. V., Gevorgiz R. G., Skripkin S. G., Tintulova M. V., Tsoi M. A., Sharifullin B. R. Experimental study of the topological flow transformations in an aerial vortex bioreactor with a floating washer. *Biotechnology Journal*, 2023a, vol. 18, iss. 8, art. no. 2200644 (7 p.). <https://doi.org/10.1002/biot.202200644>
 19. Naumov I. V., Gevorgiz R. G., Skripkin S. G., Tintulova M. V., Tsoy M. A., Sharifullin B. R. Topological flow transformations in a universal vortex bioreactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2023b, vol. 191, art. no. 109467 (12 p.). <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2023.109467>
 20. Patent EP 1120460 B1. *Apparatus for the Suspension of Cultured Cells from Tissues and Microorganisms* / Kislykh V. I., Ramazanov Ju. A., Repkov A. P. ; zayavitel' Zakrytoe aktsioner-noe obschestvo "Sayany", Biozex Technologies Corp. – no. 98963676.6 ; zayavl. 22.09.1998 ; opubl. 26.11.2003. Byul. no. 2003/48. <https://patents.google.com/patent/EP1120460B1>
 21. Patent EP 27446382 A1. *Vortex Bioreactor* / Ramazanov Yu. A., Repkov A. P. ; zayavitel' Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennostyu "Tsentri vykhrevykh tekhnology" – no. 11870985.6 ; zayavl. 13.08.2011 ; opubl. 25.06.2014. Byul. no. 2014/26. <https://patents.google.com/patent/EP2746382A1>
 22. Qiang H., Zarmi Y., Richmond A. Combined effects of light intensity, light-path and culture density on output rate of *Spirulina platensis* (Cyanobacteria). *European Journal of Phycology*, 1998, vol. 33, iss. 2, pp. 165–171. <https://doi.org/10.1080/09670269810001736663>
 23. Richmond A. Microalgal biotechnology at the turn of the millennium: A personal view. *Journal of Applied Phycology*, 2000, vol. 12, iss. 3–5, pp. 441–451. <https://doi.org/10.1023/A:1008123131307>
 24. Silva H. J., Cortifas T., Ertola R. J. Effect of hydrodynamic stress on *Dunaliella* growth. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 1987, vol. 40, iss. 1, pp. 41–49. <https://doi.org/10.1002/jctb.280400105>
 25. Torzillo G., Sacchi A., Materassi R., Richmond A. Effect of temperature on yield and night biomass loss in *Spirulina platensis* grown outdoors in tubular photobioreactors. *Journal of Applied Phycology*, 1991, vol. 3, iss. 2, pp. 103–109. <https://doi.org/10.1007/BF00003691>
 26. Vandanjon L., Rossignol N., Jaouen P., Robert J. M., Quéméneur F. Effects of shear on two microalgae species. Contribution of pumps and valves in tangential flow filtration systems. *Biotechnology and Bioengineering*, 1999, vol. 63, iss. 1, pp. 1–9. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19990405\)63:1<1::AID-BIT1>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19990405)63:1<1::AID-BIT1>3.0.CO;2-K)
 27. Ye Q., Cheng J., Guo W., Xu J., Li H., Zhou J. Numerical simulation on promoting light/dark cycle frequency to improve microalgae growth in photobioreactor with serial lantern-shaped draft tube. *Bioresource Technology*, 2018a, vol. 266, pp. 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.055>
 28. Ye Q., Cheng J., Yang Z., Yang W., Zhou J., Cena K. Improving microalgal growth by strengthening the flashing light effect simulated with computational fluid dynamics in a panel bioreactor with horizontal baffles. *RSC Advances*,

- 2018b, vol. 8, iss. 34, pp. 18828–18836. <https://doi.org/10.1039/C8RA02863J>
29. Xu J., Cheng J., Lai X., Zhang X., Yang W., Park J.-Y., Kim H., Xu L. Enhancing microalgal biomass productivity with an optimized flow field generated by double paddlewheels in a flat plate photoreactor with CO₂ aeration based on numerical simulation. *Bioresource Technology*, 2020, vol. 314, art. no. 123762 (8 p.). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123762>
30. Wang L., You X. Y. Light-gradient mixing performance improvement of the flat plate photobioreactor with waved baffles. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 2013, vol. 27, no. 2, pp. 211–218.
31. Zarrouk C. *Contribution à l'étude d'une cyanophycée. Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de Spirulina maxima (Setch et Gardner) Geitler*. PhD thesis. Paris, 1966, 114 p. (A la faculté des sciences de l'université de Paris).

**CRITICAL INTENSITY OF SWIRLING FLOWS OF A SUSPENSION
AND PRODUCTIVITY IN BATCH CULTURE
OF *ARTHROSPIRA (SPIRULINA) PLATENSIS*
UNDER DIFFERENT LIGHT CONDITIONS**

**R. Gevorgiz^{1,2}, B. Sharifullin^{2,3},
I. Naumov^{2,3}, and S. Zheleznova^{1,2}**

¹A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russian Federation

E-mail: r.gevorgiz@yandex.ru

The paper provides results of the experimental study of batch cultures of *Arthrospira (Spirulina) platensis* under conditions of critical intensity of swirling flows at different size of the working layer (the optical path). As shown, despite a 10-fold increase in the intensity of vortex mixing, the productivity of the culture decreased by 2 times, when the working layer rose by 3 times. Notably, for photosynthetic microorganisms, the key factor determining the productivity in the culture is the spatial irradiation inside cell suspension (the working layer) but with the intensity of suspension stirring taken into account. The conditions of cultivation of photosynthetic cells under which the working layer differs by 2 times, but the productivity in the culture remains the same, are experimentally demonstrated.

Keywords: vortex mixing, spirulina, photobioreactor