

Оригинальная статья / Original article

УДК 66.021.3:66.063

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-737-749>

Особенности мощностных и массообменных характеристик биореактора с дисковыми перфорированными мешалками

© Р.Б. Хабибрахманов, С.Г. Мухачев

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Резюме: Продуктивность биореактора при реализации аэробных процессов биосинтеза зависит от интенсивности массообмена кислорода. Исследованы дисковые мешалки с перфорированной поверхностью, которые обеспечивают увеличение поверхности контакта газовой и жидкой фаз. Экспериментально установлено, что мощностные характеристики дисковых мешалок с отогнутыми сегментами и секторами зависят от угла наклона рабочих поверхностей. Для многоярусных мешалок показано, что при возрастании расстояния между ярусами в диапазоне 0–1,4 от диаметра мешалки показатель степени при числе ярусов в выражении суммарной мощности пропорционален величине указанного расстояния. При расстоянии между ярусами, превышающем диаметр мешалки в 1,5 и более раз, суммарная мощность равна сумме мощностей одиночных мешалок. Энергетическая эффективность процесса массообмена кислорода резко снижается при уменьшении расстояния между ярусами. Показатель эффективности процесса массопередачи кислорода зависит от соотношения аэрации и мощности мешалки и имеет вид кривой с насыщением. Анализ всей совокупности полученных экспериментальных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что интенсивный и одновременно энергоэффективный процесс массообмена кислорода может быть обеспечен при малом отношении диаметра аппарата к его высоте, использовании многоярусных мешалок с расстоянием между ярусами, превышающими диаметр мешалки, и при удельной аэрации не менее 3 мин^{-1} . Дисковые перфорированные мешалки могут быть рекомендованы к использованию в конструкциях биореакторов, их применение предпочтительно в процессах наработки биомасс аэробных микроорганизмов, в том числе при выращивании посевных культур с высокой плотностью. Режимы, обеспечивающие достижение высокой плотности популяции аэробных микроорганизмов при скоростях массообмена кислорода, превышающих $10 \text{ кгO}_2/\text{м}^3\cdot\text{ч}$, характеризуются относительно невысокой энергоэффективностью ($1\text{--}1,2 \text{ кгO}_2/\text{кВт}\cdot\text{ч}$).

Ключевые слова: мешалка, перфорация, коэффициент мощности, коэффициент массопередачи кислорода, массообмен, энергоэффективность

Информация о статье: Дата поступления 28 июля 2019 г.; дата принятия к печати 5 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 декабря 2019 г.

Для цитирования: Хабибрахманов Р.Б., Мухачев С.Г. Особенности мощностных и массообменных характеристик биореактора с дисковыми перфорированными мешалками // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9, N 4. С. 737–749. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-737-749>

Power and mass exchange characteristics of a bioreactor equipped with disk perforated mixers

Rinat B. Khabibrakhmanov, Sergey G. Mukhachev

Kazan National Research Technological University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Abstract: In the implementation of aerobic biosynthesis processes, the productivity of a bioreactor depends on the intensity of oxygen mass transfer. Disk mixers with a perforated surface, providing an increase in the contact surface of the gas and liquid phases, were studied. The power characteristics of disk mixers with bent segments and sectors was experimentally established to depend on the slope of the working surfaces. For

multi-tier mixers, the exponent regarding the number of tiers in the expression of total power was determined to be proportional to the value of the distance between tiers in the range of specified distance equal to 0–1.4 of the diameter of the mixer. At a distance between tiers exceeding the diameter of the mixer by 1.5 or more times, the total power is equal to the sum of the powers of single mixers. The energy efficiency of the process of oxygen mass transfer decreases sharply with decreasing distance between tiers. The efficiency indicator of the oxygen mass transfer depends on the ratio of aeration and power of the mixer, demonstrated in the form of a saturation curve. An analysis of the obtained experimental dependences supports a conclusion concerning the intensive and energy-efficient process of oxygen mass transfer obtained by ensuring a small ratio of the diameter of the unit to its height, use of multi-tier mixers with a distance between tiers greater than the diameter of the mixer and specific aeration of at least 3 min^{-1} . Perforated disk mixers can be recommended for use in bioreactor designs with the optimal implementation in the processes of aerobic microorganism production, including the cultivation of high-density seed crops. At oxygen mass transfer rates exceeding $10 \text{ kgO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{h}$, modes ensuring the achievement of a high population density of aerobic microorganisms are characterised by relatively low energy efficiency ($1\text{--}1.2 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$).

Keywords: mixer, perforation, power factor, oxygen mass transfer coefficient, mass transfer, energy efficiency

Information about the article: Received July 28, 2019; accepted for publication December 5, 2019; available online December 30, 2019.

For citation: Khabibrakhmanov R.B., Mukhachev S.G. Power and mass exchange characteristics of a bioreactor equipped with disk perforated mixers. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2019;9(4):737–749. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-737-749>

ВВЕДЕНИЕ

Производительность биологических реакторов определяется плотностью популяции микроорганизмов-продуцентов. Вместе с тем при повышении плотности культуры возникают затруднения в обеспечении клеток газообразными компонентами питания. В случае аэробных культур таким компонентом является кислород. Исследование мощностных и массообменных характеристик биореакторов необходимо для решения задач энергосбережения и интенсификации абсорбции кислорода в аэробных процессах биосинтеза. Одним из типов мешалок, обеспечивающих интенсификацию процессов массообмена кислорода в условиях повышенных концентраций биомассы микроорганизмов, являются дисковые мешалки с перфорированными наклонными поверхностями [1, 2]. Однако технические характеристики мешалок данного типа исследованы недостаточно. В то же время известно, что мешалки с наклонными поверхностями имеют большую энергетическую эффективность по сравнению с турбиной Раштона [3]. Целью настоящей работы являлось получение экспериментальных зависимостей, отражающих связи между конструктивными и режимными параметрами аппаратов с дисковыми перфорированными мешалками.

Обозначения.

d_M – диаметр мешалки, мм;
 β – угол наклона сегментов, секторов, радиан;
 S_M – общая площадь мешалки, см^2 ;
 S_L – площадь сегментов, секторов, см^2 ;
 $S_{LM} = 100 \cdot S_L / S_M$ – доля площади лопастей от общей площади мешалки, %;

S_O – площадь перфорации, см^2 ;
 $S_{OL} = 100 \cdot S_O / S_L$ – доля площади перфорации от площади сегментов, %;
 $S_{LZ} = \sin(\beta_R) \cdot S_L$ – проекция сегментов на вертикальную плоскость, см^2 ;
 $S_{MZ} = S_{LZ} \cdot (100 - S_{OL}) / 100$ – проекция неперфорированной поверхности на вертикальную плоскость, см^2 ;
 S_{MZm} – суммарная проекция неперфорированной поверхности m ярусов многоярусной мешалки на вертикальную плоскость, см^2 ;
 B_W – ширина отражательной перегородки, м;
 h_B – высота отражательной перегородки, м;
 n_B – количество отражательных перегородок;
 Re_M – критерий Рейнольдса;
 Eu_M – критерий Эйлера;
 V – скорость аэрации, $\text{м}^3/\text{мин}$;
 V_G – удельная аэрация, мин^{-1} ;
 V_a – относительная скорость аэрации;
 ψ – отношение проекции сегментов или секторов на вертикальную плоскость к общей площади диска;
 K_0 – коэффициент мощности для одноярусных мешалок при отсутствии перегородок;
 K_F – коэффициент мощности для одноярусных мешалок при наличии перегородок;
 K_{\max} – коэффициент мощности для одноярусных мешалок при длине перегородок, равной высоте столба жидкости (H , м);
 K_N – обобщенный коэффициент мощности для одноярусных мешалок;
 L – расстояние мешалки от дна аппарата, см;
 ΔL – расстояние между ярусами многоярусной мешалки, см;

N – мощность одноярусной мешалки, Вт;
 N_{Σ} – мощность многоярусной мешалки, Вт;
 N_L – удельная мощность мешалки, Вт/л;
 N_a/N – отношение мощностей, вводимых мешалкой в аэрируемую и неаэрируемую среды;
 I – ток в цепи якоря двигателя привода мешалки, А;
 m – число ярусов многоярусной мешалки;
 y – показатель степени при числе ярусов многоярусной мешалки;
 w – параметр эффективности, кгО₂/кВт·ч;
 u – режимный параметр, м³/кВт·мин;
 n – угловая скорость вращения мешалки, мин⁻¹;
 E – энергетическая эффективность массо-передачи кислорода, кгО₂/кВт·ч;

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Конструктивные параметры биореактора и встроенных элементов.

Известен ряд конструктивных решений элементов биореактора, обеспечивающих интенсивный режим аэрации и массообмена кислорода. К таким конструкциям относится и многоярусная дисковая мешалка с перфорированными поверхностями [1, 4]. В отличие от турбинной мешалки с наклонными лопастями, для которой

характерно уменьшение мощности в 3 раза при изменении угла наклона от 60 до 30° [5], мощность дисковой мешалки уменьшается в 2,5 раза. Диски имеют отогнутые сегменты (рис. 1, а) или секторы, образующие гофры (рис. 1, б) с перфорированной поверхностью, за счет чего осуществляется режим разнонаправленных пульсаций и диспергация газового потока с возникновением мелкоячеистой динамической пены. Интенсификация массообмена кислорода обеспечивается при этом за счет существенного увеличения поверхности контакта фаз.

Угол наклона рабочих поверхностей является основной технической характеристикой мешалок данного типа. Перфорация представляет собой конические отверстия (усеченный конус, большее основание которого на каждой половине диска с отгибами и на каждой половине гофра обращено в сторону набегающего потока).

Геометрические параметры исследованных ярусов дисковой мешалки представлены в табл. 1, где № 1–5 – диски с отогнутыми сегментами, № 6 – «гофрированный» диск. Параметры отражательных перегородок: количество – 4, ширина – 15 мм, высота – 142 мм, расстояние нижнего края перегородки от днища – 70 мм.



a



b

Рис. 1. Мешалки различной конструкции с перфорированной поверхностью

Fig. 1. Stirrers of various design with perforated surface

Геометрия ярусов дисковых мешалок

Disk stirrer geometry

Таблица 1

Table 1

| Параметр | Конструкция яруса мешалки | | | | | |
|---|---------------------------|------|------|------|------|------|
| | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 | № 5 | № 6 |
| Диаметр, мм | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Угол наклона, град. | 10° | 17° | 23° | 35° | 55° | 20° |
| Площадь лопастей (сегменты, секторы), см ² | 53,8 | 53,8 | 53,8 | 53,8 | 53,8 | 64,4 |
| Доля площади лопастей, % от общей площади мешалки | 68,5 | 68,5 | 68,5 | 68,5 | 68,5 | 82,0 |
| Проекция лопастей на вертикальную плоскость, см ² | 9,3 | 15,7 | 21,0 | 30,9 | 44,1 | 22,0 |
| Доля площади перфорации лопастей, % | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 13,2 |
| Проекция неперфорированной поверхности на вертикальную плоскость, см ² | 7,9 | 13,2 | 17,7 | 26,0 | 37,1 | 19,1 |
| Отношение проекции сегментов или секторов на вертикальную плоскость к общей площади диска | 0,10 | 0,17 | 0,23 | 0,33 | 0,47 | 0,24 |

Конструктивные параметры реактора, мм: внутренний диаметр – 150; высота отбортовки днища – 70; высота царги с рубашкой теплообмена – 210; высота крышки с полусферической верхней частью – 150.

Измеряемые и регулируемые параметры: скорость вращения мешалки (тахометр-частотомер фирмы ОВЕН); ток и напряжение в цепи ротора (тестр); расход воздуха (ротаметр РС-3); концентрация растворенного кислорода и температура жидкости (Мультитест); концентрация кислорода в отработанном воздухе (газоанализатор ГАММА-100); расход отработанного воздуха (барабанный счетчик Р7000); температура жидкости и газа (ДТС015-50М, терморегулятор ТРМ210, ОВЕН).

Мощностные характеристики биореактора с дисковыми мешалками.

Эксперименты по исследованию мощностных характеристик мешалок проводились при заливе жидкости (дистиллированная вода) в объеме 5 дм³, а по исследованию массообменных характеристик – при заливе 3 дм³ жидкости.

Характеристики аппарата с одно- и многоярусными дисковыми мешалками исследовались при режимах работы, соответствующих потребности аэробных микроорганизмов в кислороде. Мощность, вводимая в жидкость или газо-жидкостную среду, определялась по разности мощностей при работе мешалки в среде и в воздухе при каждом значении скорости вращения. При этом ток в цепи статора стабилизировался во всех случаях на одном уровне. Величины мощностей на валу перемешивающего устройства определялись на основе экспери-

ментально полученной зависимости крутящего момента от тока в цепи якоря. Крутящий момент определялся с помощью цифрового динамометра в трех повторностях при прямом и обратном медленном вращении вала с установленным шкивом диаметром 100 мм и питании цепи якоря от стабилизатора тока.

Значение критерия Рейнольдса в проведенных экспериментах находилось в диапазоне 62 000–310 000.

Критериальные зависимости для аппаратов с дисковыми мешалками при наличии отражательных перегородок и без них представлены на рис. 2.

Подобные зависимости в координатах критериев Рейнольдса и Эйлера для мешалок известных типов (турбинная, лопастная, якорная, рамная, пропеллерная и др.) имеют в области рассчитанных значений критерия Рейнольдса $(0,6-3,2) \cdot 10^5$ вид наклонных прямых [4]. Мощностные характеристики дисковых мешалок с углом наклона рабочих поверхностей менее 27° отличаются тем, что критерий Эйлера не зависит от величины критерия Рейнольдса (автомодельная область, рис. 2). Таким образом, дисковые мешалки с малым углом наклона лопастей качественно близки к мешалкам турбинного типа, для которых автомодельная область наблюдается в диапазоне значений критерия Рейнольдса, превышающих 10^4 [6]. Характер зависимости $Eu_M = F(Re_M)$ одинаков как при наличии, так и отсутствии отражательных перегородок. При этом абсолютные значения критерия Эйлера для дисковых мешалок ниже, чем для мешалок других типов.

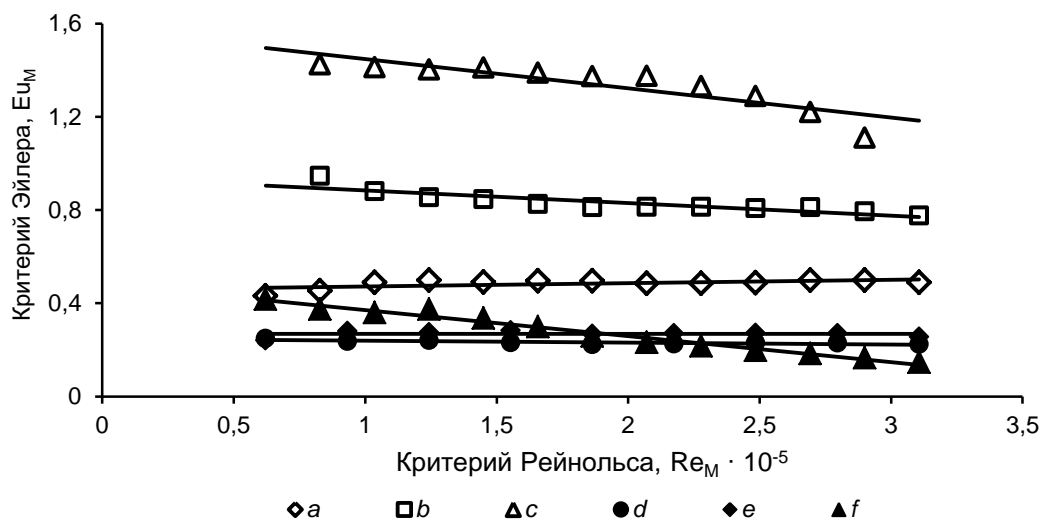


Рис. 2. Экспериментальные критериальные зависимости для одноярусных мешалок: с отражательными перегородками (a – мешалка № 3; b – мешалка № 4; c – мешалка № 5); без отражательных перегородок (d – мешалка № 2; e – мешалка № 3; f – мешалка № 5)

Fig. 2. Experimental criterial dependence for single-tier stirrers: with baffles (a – stirrer no. 3; b – stirrer no. 4; c – stirrer no. 5); without baffles (d – stirrer no. 2; e – stirrer no. 3; f – stirrer no. 5)

В соответствии с известным выражением мощность мешалки равна [7, 8]

$$N = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (1)$$

Экспериментально полученные значения мощности одноярусных мешалок при варьировании скорости вращения, удельной аэрации и установке их на расстоянии от днища, равному диаметру мешалки, представлены в табл. 2.

Мощность при увеличении аэрации снижается тем значительнее, чем выше угол наклона ра-

бочей поверхности мешалки, что связано с характером изменения газосодержания, определяющего эффективную плотность газожидкостной среды.

Мощность одноярусных мешалок при варьировании расстояния от днища аппарата показана в табл. 3.

Как видно из данных, представленных в табл. 3, коэффициент мощности K_N одноярусных мешалок находится в линейной зависимости от расстояния между центром диска мешалки и днищем аппарата (рис. 3).

Таблица 2

Мощности одноярусных мешалок, $L/d_M = 1$

Table 2

Power of single-tier stirrers, $L/d_M = 1$

| Угловая скорость вращения мешалки, n , мин ⁻¹ | Удельная величина аэрации, V_G , мин ⁻¹ | Мощность одноярусной мешалки, N , Вт | | | |
|--|--|--|--------|--------|--------|
| | | № 3 | № 4 | № 5 | № 6 |
| 400 | 0 | 1,34 | 2,79 | 4,20 | 2,66 |
| 600 | 0 | 4,96 | 8,51 | 13,96 | 9,87 |
| 800 | 0 | 11,69 | 19,48 | 32,74 | 22,54 |
| 1000 | 0 | 22,34 | 37,47 | 63,31 | 44,13 |
| 1200 | 0 | 38,82 | 64,28 | 102,56 | 78,98 |
| 1400 | 0 | 63,00 | 100,36 | 140,23 | 118,97 |
| 400 | 1,0 | 1,48 | 2,39 | 2,61 | 3,11 |
| 600 | 1,0 | 3,69 | 7,53 | 9,85 | 9,43 |
| 800 | 1,0 | 11,38 | 16,50 | 27,67 | 21,54 |
| 1000 | 1,0 | 21,39 | 33,15 | 55,05 | 41,33 |
| 1200 | 1,0 | 35,38 | 57,12 | 87,56 | 71,11 |
| 1400 | 1,0 | 57,56 | 87,57 | 118,65 | 109,19 |
| 400 | 2,5 | 1,26 | 1,67 | 2,82 | 2,75 |
| 600 | 2,5 | 3,69 | 4,73 | 7,84 | 7,09 |
| 800 | 2,5 | 8,27 | 10,22 | 16,39 | 15,64 |
| 1000 | 2,5 | 15,81 | 18,01 | 30,32 | 28,01 |
| 1200 | 2,5 | 26,35 | 29,37 | 49,72 | 46,74 |
| 1400 | 2,5 | 43,33 | 44,09 | 76,54 | 72,64 |

Таблица 3

Удельные мощности одноярусных мешалок, Вт/л

Table 3

Specific power of single-tier stirrers, W / L

| Угловая скорость вращения мешалки n , мин ⁻¹ | Конструкция яруса мешалки | | | | | |
|---|---|------|------|------|------|------|
| | № 3 | № 4 | | | | № 5 |
| | Расстояние мешалки от днища аппарата L , см | | | | | |
| | 15,5 | 5,5 | 8,0 | 10,5 | 15,5 | 5,5 |
| 400 | 0,31 | 0,30 | 0,24 | 0,38 | 0,39 | 0,40 |
| 500 | 0,43 | 0,62 | 0,61 | 0,75 | 0,77 | 0,90 |
| 600 | 0,67 | 1,06 | 1,03 | 1,32 | 1,29 | 1,64 |
| 700 | 1,07 | 1,73 | 1,69 | 2,03 | 2,18 | 2,64 |
| 800 | 1,53 | 2,58 | 2,41 | 2,95 | 3,15 | 3,86 |
| 900 | 2,17 | 3,56 | 3,39 | 4,04 | 4,42 | 5,58 |

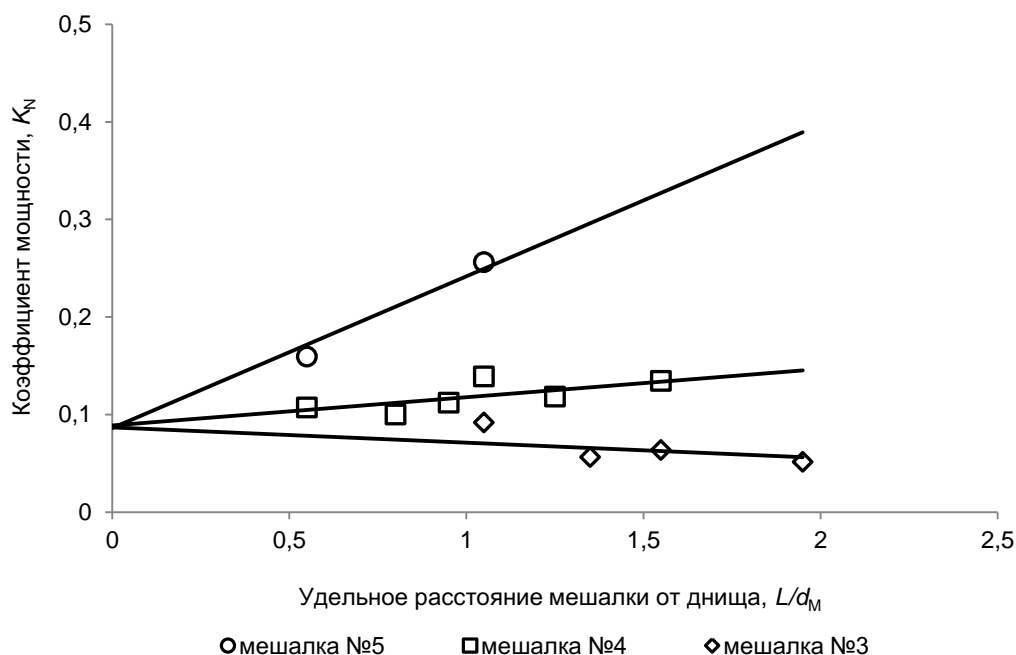


Рис. 3. Зависимость коэффициентов мощности от расстояния мешалки до днища аппарата

Fig. 3. Relationship between power factors and distance from stirrer to apparatus bottom

Данные получены при отсутствии аэрации и усреднении значений коэффициента мощности при варьировании скорости вращения мешалки. Эксперименты реализованы в 3–4 повторностях. Общее число замеров составило 154 для мешалок № 3–5. Наклон графиков полученных зависимостей положителен при углах отгиба секторов более $27\text{--}28^\circ$. При меньших углах наклона рабочих поверхностей мешалки коэффициент мощности K_N почти не зависит от расстояния между мешалкой и дном аппарата. При приближении мешалок к дну аппарата все линии полученных зависимостей сходятся к одной точке, $K_N(0) \approx 0,087$.

Сравнение параметров одноярусных дисковых мешалок с мешалками других конструкций было проведено на основе корреляционной зависимости, предложенной Haruki Furukawa с сотрудниками (Нагойский технологический институт, Япония) [9]. Указанная корреляционная зависимость обобщает результаты испытаний 7 конструкций мешалок различного типа, имеет вид кривой с насыщением и построена в координатах X – Y :

$$X = \frac{4,5(B_w/D) \cdot (h_B/H) \cdot n_B^{0,8}}{[(2\beta/\pi)^{0,72} \cdot K_{max}^{0,2}]} + K_0/K_{max};$$

$$Y = K_p/K_{max}.$$

Авторы подчеркивают универсальный характер предложенной ими корреляции. Характерные точки по оси абсцисс для турбинных,

пропеллерных, лопастных, шнековых и якорных мешалок расположены в диапазоне от $X = 0,4$ до $X = 1,2$. Нами были рассчитаны значения X и Y для одноярусных дисковых мешалок № 3 и 5 при различной скорости вращения в неаэрированной среде. Все полученные точки легли на указанную корреляционную зависимость. Отличие дисковых мешалок проявилось в том, что характерные точки легли на линию насыщения в область значений X выше 1,2 (погрешность не превышала 3 %). Таким образом, полученные нами данные полностью подтверждают адекватность корреляционной модели, предложенной авторами работы [9].

Одной из мощностных характеристик механических мешалок является отношение мощностей, вводимых мешалкой в аэрируемую и неаэрируемую среды (N_a/N). Это отношение существенно зависит от типа мешалки и относительной скорости аэрации – $V_a = V/(60 \cdot n \cdot d_M)$ [10–13]. Для исследуемых одноярусных мешалок зависимость представлена для скорости вращения 800 и 1400 мин^{–1} (рис. 4, А и 4, В соответственно). Имеет место качественное различие характеристик, полученных для двух групп дисковых мешалок – с углом наклона меньше и больше 27° .

В табл. 4. приведены значения удельной мощности для двухъярусной конструкции № 4 при установке нижнего яруса на расстоянии 5,5 см от днища аппарата и отсутствии аэрации.

Мощность трехъярусных мешалок представлена в табл. 5.

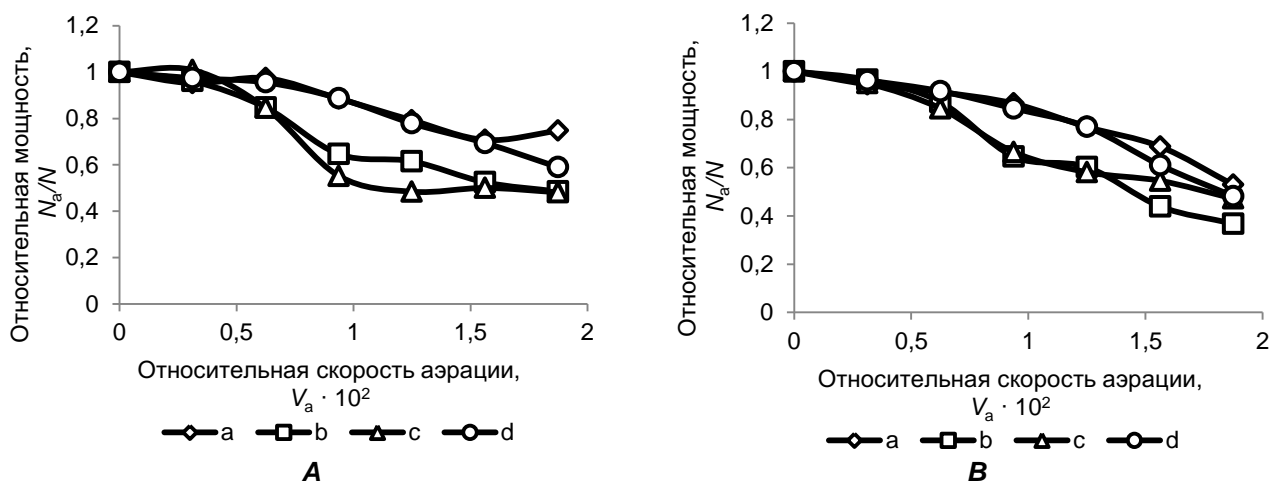


Рис. 4. Зависимость отношения мощностей от относительной скорости аэрации при скорости вращения 800 мин⁻¹ (А) и 1400 мин⁻¹ (В):
 а – мешалка № 3; б – мешалка № 4; с – мешалка № 5; d – мешалка № 6

Fig. 4. Relationship between power ratio and relative aeration rate at rotational velocity 800 min⁻¹ (A) and 1400 min⁻¹ (B):
 a – stirrer no. 3; b – stirrer no. 4; c – stirrer no. 5; d – stirrer no. 6

Таблица 4

Мощность двухъярусных мешалок № 4

Table 4

Power of two-tier stirrers no. 4

| Угловая скорость вращения мешалки, n , мин ⁻¹ | Расстояние между ярусами мешалки, ΔL , см | Расстояние верхней мешалки от днища аппарата, L_2 , см | Удельная мощность мешалки, N_L , кВт/м ³ |
|--|---|--|---|
| 500 | 2,5 | 8,0 | 0,73 |
| | 5,0 | 10,5 | 0,91 |
| | 10,0 | 15,5 | 1,14 |
| 600 | 2,5 | 8,0 | 1,25 |
| | 5,0 | 10,5 | 1,51 |
| | 10,0 | 15,5 | 1,95 |
| 700 | 2,5 | 8,0 | 1,96 |
| | 5,0 | 10,5 | 2,49 |
| | 10,0 | 15,5 | 3,11 |
| 800 | 2,5 | 8,0 | 2,91 |
| | 5,0 | 10,5 | 3,67 |
| | 10,0 | 15,5 | 4,66 |

Таблица 5

Мощности трехъярусных мешалок

Table 5

Power of three-tier stirrers

| Ярусы мешалки | n , мин ⁻¹ | N_L , кВт/м ³ , эксперимент | N_L , кВт/м ³ , расчет |
|-----------------|-------------------------|--|-------------------------------------|
| № 4 + № 4 + № 3 | 400 | 0,54 | 0,56 |
| | 500 | 1,10 | 1,02 |
| | 600 | 1,85 | 1,71 |
| | 700 | 2,85 | 2,72 |
| | 800 | 4,23 | 3,97 |
| | 900 | 6,05 | 5,49 |
| № 5 + № 4 + № 3 | 400 | 0,79 | 0,67 |
| | 500 | 1,36 | 1,27 |
| | 600 | 2,36 | 2,22 |
| | 700 | 3,70 | 3,51 |
| | 800 | 6,07 | 5,09 |
| | 900 | 7,66 | 7,20 |

Как следует из данных о мощности одноярусных и многоярусных мешалок (см. табл. 3–5), мощность в расчете на один ярус многоярусной мешалки меньше мощности одноярусной мешалки, что согласуется с результатами экспериментов других авторов [14, 15].

Для многоярусных мешалок с числом ярусов m было показано, что в выражении суммарной мощности $N_{\Sigma} = [(\Sigma N_i) / m] \cdot m^y$ показатель

степени y при числе ярусов m зависит от отношения расстояния между ярусами к диаметру мешалки – $\Delta L / d_M$ (рис. 5). Эта зависимость линейна и для исследованных конструкций дисковых мешалок имеет вид:

$$y = (a \cdot \Delta L / d_M) \cdot (S_{Mzm} / S_{Mz2}),$$

где $a = 0,71$.

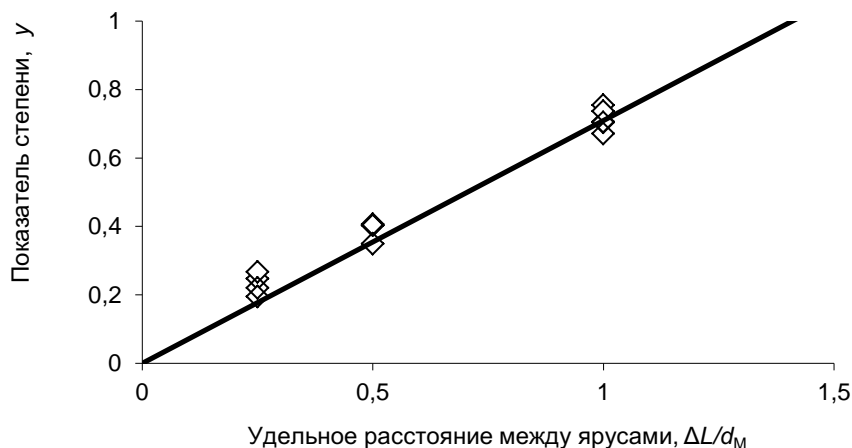


Рис. 5. Зависимость показателя степени при числе ярусов мешалки от относительного расстояния между ярусами

Fig. 5. Relationship between the exponent at number of stirrer tiers and the relative distance between the tiers

Предельное значение показателя степени при числе ярусов мешалки равно 1. Это значение достигается при $\Delta L / d_M \geq 1,444$. Расчеты были выполнены исходя из соотношения мощностей многоярусных мешалок (N_{Σ}) и среднего значения мощностей одноярусных мешалок $N_{cp} = (\Sigma N_i) / m$, установленных на соответствующих расстояниях от днища аппарата.

Таким образом, при удалении ярусов друг от друга на расстояние $1,5 \cdot d_M$ они «работают независимо», то есть суммарная мощность многоярусной мешалки в этом случае равна сумме мощностей отдельных одиночных ярусов [16].

При сближении ярусов (в пределе до нуля) мощность многоярусной мешалки стремится к среднему значению для одноярусной конструкции со средним углом наклона рабочих поверхностей.

Массообменные характеристики биореактора с дисковыми мешалками.

Предельные массообменные характеристики аппарата с дисковыми перфорированными мешалками были получены с использованием сульфитной методики.

Определение сульфитного числа проводилось следующими способами [17]:

1. На основе измерения расходов газовых потоков (воздуха) на входе и выходе аппарата, приведенных к нормальным условиям:

$$V_{in}^n = V_{in} \cdot P \cdot 273,2 / (760 \cdot (273,2 + T)); \quad (2)$$

$$V_{out}^n = V_{out} \cdot P \cdot 273,2 / (760 \cdot (273,2 + T)); \quad (3)$$

Объемный расход кислорода равен:

$$V_{O_2} = V_{in}^n - V_{out}^n; \quad (4)$$

Сульфитное число рассчитывается по формуле

$$R_{O_2} = 60 \cdot V_{O_2} \cdot 32 / (22,4 \cdot V_L); \quad (5)$$

2. На основе баланса инертных компонентов газового потока:

$$V_{in}^n = V_{in}^n \cdot 0,21 - V_{out}^n \cdot C_{O_2}; \quad (6)$$

$$V_{O_2} = 60 \cdot V_{O_2} \cdot 32 / (22,4 \cdot V_L); \quad (7)$$

$$R_{O_2} = 60 \cdot V_{O_2} \cdot 32 / (22,4 \cdot V_L); \quad (8)$$

3. На основе времени окисления фиксированной дозы сульфита натрия:

$$R_{Na_2SO_3} = M_{Na_2SO_3} / \Delta t; \quad (9)$$

$$R_{O_2} = (16 / 126) \cdot (R_{Na_2SO_3} / V_L); \quad (10)$$

где V_{in} – расход воздуха на входе в аппарат, измеряемый ротаметром РСЗ, $\text{дм}^3/\text{мин}$; V_{out} – расход отработанного воздуха на выходе из аппарата, измеряемый газовым барабанным счетчиком РГ 7000, $\text{дм}^3/\text{мин}$; V_{in}^n и V_{out}^n – расходы газовых потоков на входе и выходе аппарата, приведенные к нормальным условиям, $\text{н дм}^3/\text{мин}$; V_{O_2} – расход кислорода, $\text{дм}^3/\text{мин}$; V_L – объем жидкости в аппарате (3 дм^3); R_{O_2} – сульфитное число, $\text{кгO}_2/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$; C_{O_2} – объемная доля кислорода в отработанном воздухе; $M_{Na_2SO_3} = 112,5$ – масса навески сульфита натрия, г; Δt – время окисления дозы сульфита натрия, ч; $16/126$ – стехиометрическое соотношение масс кислорода и сульфита натрия по реакции окисления.

Расчеты величин сульфитного числа, выполненные по указанным выше алгоритмам ((2)–(5), (6)–(8) и (9)–(10)) дают близкие значения. Относительные погрешности по этим методам составили соответственно 2,92; 2,08 и 2,87 % [17].

Определение сульфитного числа было

реализовано в двух группах экспериментов:

- 1) при примерно постоянной вводимой мощности одноярусной мешалкой (табл. 6);
- 2) при различных скоростях вращения трехъярусной мешалки (ярусы № 2+№ 4+№ 4) (табл. 7).

В экспериментах исследовались режимы аэрации и перемешивания, необходимые для обеспечения жизнедеятельности плотных культур аэробных микроорганизмов, обеспечивающих высокую продуктивность биореакторов.

Энергетическая эффективность E процесса массопередачи кислорода при относительно малой величине удельной аэрации – 1 мин^{-1} , возрастает с увеличением угла наклона рабочей поверхности одноярусной мешалки, а при больших значениях аэрации – снижается (см. табл. 6 и 7). При всех реализованных значениях аэрации эффективность трехъярусной мешалки снижается с увеличением скорости вращения (соответственно, при возрастании мощности мешалки). Однако эти зависимости выражены слабо.

Таблица 6

Параметры массообмена кислорода при одноярусной мешалке

Table 6

Oxygen mass exchange parameters in single-tier stirrer

| Номер эксперимента | Тип мешалки | $V_G, \text{мин}^{-1}$ | $n, \text{мин}^{-1}$ | $N, \text{Вт}$ | $R_{O_2}, \text{кгO}_2/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$ | $E, \text{кгO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ |
|--------------------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|---|---|
| 1 | № 2 | 1 | 1870 | 19,74 | 8,50 | 0,43 |
| | | 2 | 2000 | 16,84 | 14,27 | 0,84 |
| | | 3 | 2050 | 17,26 | 15,54 | 0,89 |
| 2 | № 4 | 1 | 1800 | 18,27 | 8,69 | 0,48 |
| | | 2 | 1940 | 16,45 | 12,01 | 0,72 |
| | | 3 | 2050 | 17,14 | 14,24 | 0,82 |
| 3 | № 5 | 1 | 1670 | 18,88 | 9,81 | 0,52 |
| | | 2 | 1750 | 17,76 | 10,91 | 0,61 |
| | | 3 | 1870 | 18,66 | 14,27 | 0,75 |

Таблица 7

Параметры массообмена кислорода при трехъярусной мешалке

Table 7

Oxygen mass exchange parameters in three-tier stirrer

| Номер эксперимента | $V_G, \text{мин}^{-1}$ | $n, \text{мин}^{-1}$ | $N, \text{Вт}$ | $R_{O_2}, \text{кгO}_2/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$ | $E, \text{кгO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ |
|--------------------|------------------------|----------------------|----------------|---|---|
| 4 | 1 | 700 | 3,96 | 3,36 | 0,84 |
| | 2 | 700 | 3,67 | 3,49 | 0,92 |
| | 3 | 700 | 3,23 | 4,36 | 1,25 |
| 5 | 1 | 1200 | 14,95 | 8,46 | 0,56 |
| | 2 | 1200 | 13,70 | 11,66 | 0,84 |
| | 3 | 1200 | 13,01 | 10,78 | 0,81 |
| 6 | 1 | 1700 | 33,63 | 10,48 | 0,31 |
| | 2 | 1700 | 31,86 | 16,09 | 0,50 |
| | 3 | 1700 | 30,69 | 12,26 | 0,40 |

Обработка всей совокупности результатов экспериментов с одноярусными и многоярусными мешалками привела к следующему корреляционному выражению связи между геометрическими и режимными параметрами:

$$w = w_{\max} \cdot u / (0,3 + u), \quad (11)$$

где $u = V_G / [(tg\beta)^{0,5} \cdot N_L]$; $w = E \cdot m^{0,14}$; $w_{\max} = 1,5$.

Полученный при исследовании массообмена кислорода график данной экспериментальной зависимости приведен на рис. 6.

С увеличением расхода газа в расчете на единицу мощности мешалки энергетическая эффективность возрастает, при этом величина w асимптотически приближается к пределу $w_{\max} / m^{0,14}$, лежащему в диапазоне 1,3–1,5 и определяемому, очевидно, всей совокупностью физических и конструктивных параметров. Это не очень высокое значение эффективности, но оно получено для достаточно высокой средней скорости абсорбции кислорода – 10,5 кгО₂/м³·ч, которая соответствует интенсивному режиму аэробного биосинтеза. По известным данным [18], максимальная скорость потребления кислорода дрожжами – продуцентами этанола, выращиваемыми в аэробных условиях, составляет 4,3 моль/кгАСБ·ч. При концентрации биомассы, равной 50 кгАСБ/м³, получаем скорость потребления кислорода 6,88 кг/м³·ч. По данным

В.В. Кафарова с соавторами, удельная скорость потребления кислорода дрожжами на н-парафинах нефти достигает 12 кг/м³·ч, а при культивировании бактерий, растущих на метане, – 16 кг/м³·ч [19].

В процессе периодического глубинного культивирования спорообразующих бактерий *B.subtilis* G-28 [20] при концентрации биомассы 21,7 кгАСБ/м³ интенсивность абсорбции кислорода достигла 11 кгО₂/м³·ч. Процесс проводился в реакторе с трехъярусной дисковой мешалкой. Рабочие поверхности сегментов ярусов имели угол атаки 10, 15 и 15° (расположение сверху вниз). Расстояние между ярусами было равно 0,5· d_M . Таким образом, мешалки данного типа в реальном процессе биосинтеза обеспечивают интенсивность массообмена кислорода, достигаемую в условиях сульфитной модели. А в пилотном биореакторе с шестиярусной мешалкой с радиально-гофрированными дисками сульфитное число превысило 24 кгО₂/м³·ч [2]. При аналогичной конструкции двухъярусной мешалки, установленной вместо турбины Раштона, в посевном биореакторе объемом 10 м³ в доливном процессе выращивания продуцента лизина *Brevibacterium* sp. ВНИИгенетика-90 на Трипольском биохимзаводе (Украина, 1993 г.) биомассу посевного материала удалось увеличить более чем в 3 раза. При этом длительность процесса возросла лишь на 3 ч – с 18 до 21 ч.

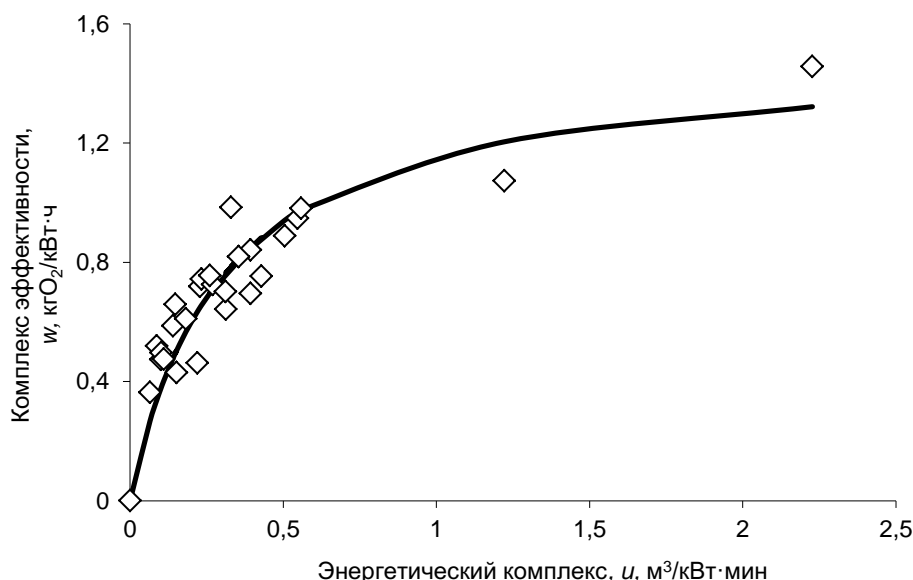


Рис. 6. Зависимость энергетической эффективности процесса массопередачи кислорода от соотношения аэрации и мощности мешалки

Fig. 6. Relationship between the energy efficiency of oxygen mass transfer and aeration ratio to stirrer power

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ всей совокупности полученных экспериментальных зависимостей позволяет сде-

лать вывод о том, что интенсивный и одновременно энергоэффективный процесс массообмена кислорода может быть обеспечен при:

– отношении диаметра аппарата к его высоте 1:2,5–1:3;

– использовании многоярусных мешалок с расстоянием между ярусами, превышающими диаметр мешалки;

– удельной аэрации не менее 2 мин⁻¹.

Дисковые перфорированные мешалки могут быть рекомендованы к использованию в конструкциях биореакторов. Режимы, обеспечивающие достижение высоких плотностей популяции

аэробных микроорганизмов при скоростях массообмена кислорода, превышающих 10 кгО₂/м³·ч, характеризуются энергетической эффективностью 1–1,2 кгО₂/кВт·ч.

Применение дисковых перфорированных мешалок с наклонными рабочими сегментами и секторами предпочтительно в процессах наработки биомасс аэробных микроорганизмов, в том числе при выращивании посевных культур с высокой плотностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2021849, Российская Федерация. Перемешивающее устройство для многофазных сред / С.Г. Мухачев, Р.И. Валеев, Ш.Г. Еникеев, В.П. Верхорулов, В.А. Шушков; заявл. 09.04.1991; опубл. 30.10.1994.
2. Мухачев С.Г., Чепегин И.В., Валеев Р.И., Еникеев Ш.Г., Джелинео А. История создания и результаты испытаний пилотного биореактора интенсивного массообмена G-1000 Сербской фирмы «GOSA» // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. N 23. С. 39–41.
3. Cudak M. Hydrodynamic Characteristics of Mechanically Agitated Air-Aqueous Sucrose Solutions // Chemical and Process Engineering. 2014. Vol. 35. Issue 1. P. 97–107. <https://doi.org/10.2478/cpe-2014-0007>
4. Хабибрахманов Р.Б., Мухачев С.Г. Исследование мощностных характеристик перфорированных одноярусных мешалок при варьировании аэрации // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. N 11. С. 172–174.
5. Major-Godlowska M., Karcz J. Power consumption for an agitated vessel equipped with pitched blade turbine and short baffles // Chemical Papers. 2018. Vol. 72. P. 1081–1088. <https://doi.org/10.1007/s11696-017-0346-x>
6. Bates R.L., Fondy P.L., Corpstein R.R. Examination of Some Geometric Parameters of Impeller Power // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. 1963. Vol. 2. Issue 4. P. 310–314. <https://doi.org/10.1021/i260008a011>
7. Bissel E.S., Hesse H.C., Everett H.I., Rusthon I.H. Design and use of internal devices in agitated vessels // Chemical Engineering Progress. 1947. Vol. 43. Issue 12. P. 649.
8. Кафаров В.В. Процессы перемешивания в жидких средах. М.; Л.: Госхимиздат, 1949. 88 с.
9. Haruki Furukawa, Yoshihito Kato, Yoshiro Inoue, Tomoho Kato, Yutaka Tada, Shunsuke Hashimoto. Correlation of Power Consumption for Several Kinds of Mixing Impellers // International Journal of Chemical Engineering. 2012. Vol. 2012. Article ID 106496. 6 p. <https://doi.org/10.1155/2012/106496>
10. Aerstin F., Street G. Agitation and Mixing. In: Applied Chemical Process Design. Springer, Boston, MA. 1978. P. 9–28. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3976-2_2
11. Bailey J.E., Ollis D.F. Biochemical Engineering Fundamentals. 2 Ed. New York: McGraw-Hill Book Company. 1986. 984 p.
12. Luong H.T., Volesky B. Mechanical Power Requirements of Gas-Liquid Agitated Systems // AIChE Journal. 1979. Vol. 25. Issue 5. P. 893–895. <https://doi.org/10.1002/aic.690250520>
13. Robinson C.W., Hassan I.T.M. Stirred-Tank Mechanical Power Requirement and Gas Holdup in Aerated Aqueous Phases // AIChE Journal. 1977. Vol. 23. Issue 1. P. 48–56. <https://doi.org/10.1002/aic.690230109>
14. Adamiak R., Karcz J. Effects of Type and Number of Impellers and Liquid Viscosity on the Power Characteristics of Mechanically Agitated Gas-Liquid Systems // Chemical Papers. 2007. Vol. 61. Issue 1. P. 16–23. <https://doi.org/10.2478/s11696-006-0089-6>
15. Kamieński J., Niżnik J. Mieszanie układów dwufazowych ciecz-gaz w aparatach z kilkoma mieszadłami // Inżynieria Chemiczna i Procesowa. 1999. Tom 20. Numer 3. P. 299–325.
16. Хабибрахманов Р.Б., Мухачев С.Г. Оценка влияния параметров расположения дисковых мешалок на их мощностные характеристики // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. N 5. С. 53–55.
17. Хабибрахманов Р.Б., Мухачев С.Г. Оценка погрешностей балансовых методов определения скорости абсорбции кислорода раствором сульфата натрия // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. N 1. С. 124–126.
18. Hagman A., Säll T., Piškur J. Analysis of the yeast short-term Crabtree effect and its origin // FEBS Journal. 2014. Vol. 281. P. 4805–4814. <https://doi.org/10.1111/febs.13019>
19. Кафаров В.В., Винаров А.Ю., Гордеев Л.С. Моделирование и системный анализ биохимических производств. М.: Лесная промышленность, 1985. 280 с.
20. Хабибрахманов Р.Б., Мухачев С.Г. Эффективность массопередачи кислорода в процессах культивирования *Bacillus subtilis* // Вестник технологического университета. 2018. Т. 21. N 1. С. 193–195.

REFERENCES

1. Mukhachev SG, Valeev RI, Enikeev ShG, Verchorubov VP, Shushkov VA. *Mixing device for multiphase media*. Patent RF, no. 2021849, 1994. (In Russian)
2. Mukhachev SG, Chepegin IV, Valeev RI, Enikeev ShG, Dzhelineo A. The history of the creation and test results of a pilot bioreactor of intensive mass exchange G-1000 of a Serbian company "GOSA". *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta* = Bulletin of the Technological University. 2015;18(23):39–41. (In Russian)
3. Cudak M. Hydrodynamic Characteristics of Mechanically Agitated Air-Aqueous Sucrose Solutions. *Chemical and Process Engineering*. 2014;35(1):97–107. <https://doi.org/10.2478/cpe-2014-0007>
4. Khabibrakhmanov RB, Mukhachev SG. Investigation of the power characteristics of perforated single-tier mixers with varying aeration. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta* = Bulletin of Technological University. 2012;15(11):172–174. (In Russian)
5. Major-Godlewski M, Karcz J. Power consumption for an agitated vessel equipped with pitched blade turbine and short baffles. *Chemical Papers*. 2018;72:1081–1088. <https://doi.org/10.1007/s11696-017-0346-x>
6. Bates RL, Fondy PL, Corpstein RR. Examination of Some Geometric Parameters of Impeller Power. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. 1963;2(4):310–314. <https://doi.org/10.1021/i260008a011>
7. Bissel ES, Hesse HC, Everett HI, Ruston IH. Design and use of internal devices in agitated vessels. *Chemical Engineering Progress*. 1947;43(12):649.
8. Kafarov VV. *Mixing processes in liquid media*. Moscow, Leningrad: Goskhimizdat, 1949, 88 p. (In Russian)
9. Furukawa H, Kato Y, Inoue Y, Kato T, Tada Y, Hashimoto S. Correlation of Power Consumption for Several Kinds of Mixing Impellers. *International Journal of Chemical Engineering*. 2012; 2012. Article ID 106496. 6 p. <https://doi.org/10.1155/2012/106496>
10. Aersten F, Street G. Agitation and Mixing. In: *Applied Chemical Process Design*. Springer, Boston, MA. 1978, pp. 9–28. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3976-2_2
11. Bailey JE, Ollis DF. *Biochemical Engineering Fundamentals*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Company. 1986, 984 p.
12. Luong HT, Volesky B. Mechanical Power Requirements of Gas-Liquid Agitated Systems. *AIChE Journal*. 1979;25(5):893–895. <https://doi.org/10.1002/aic.690250520>
13. Robinson CW, Hassan ITM. Stirred-Tank Mechanical Power Requirement and Gas Holdup in Aerated Aqueous Phases. *AIChE Journal*. 1977;23(1):48–56. <https://doi.org/10.1002/aic.690230109>
14. Adamiak R, Karcz J. Effects of Type and Number of Impellers and Liquid Viscosity on the Power Characteristics of Mechanically Agitated Gas-Liquid Systems. *Chemical Papers*. 2007; 61(1):16–23. <https://doi.org/10.2478/s11696-006-0089-6>
15. Kamiński J, Niżnik J. Mieszanie układów dwufazowych ciecz-gaz w aparatach z kilkoma mieszadłami. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa* = Chemical and Process Engineering. 1999;20(3):299–325. (In Polish)
16. Khabibrakhmanov RB, Mukhachev SG. Assessment (of the influence) of the parameters of disk mixers location on their power characteristics. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta* = Bulletin of the Technological University. 2017;20(5):53–55. (In Russian)
17. Khabibrakhmanov RB, Mukhachev SG. Estimation of errors in the balance method of determining rate of oxygen absorption by solution of sodium sulphite. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta* = Bulletin of the Technological University. 2016;19(1):124–126. (In Russian)
18. Hagman A, Säll T, Piškur J. Analysis of the yeast short-term Crabtree effect and its origin. *FEBS Journal*. 2014;281: 4805–4814. <https://doi.org/10.1111/febs.13019>
19. Kafarov VV, Vinarov AU, Gordeev LS. *Modeling and system analysis of biochemical production*. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1985, 83 p. (In Russian)
20. Khabibrakhmanov RB, Mukhachev SG. Efficiency of oxygen mass transfer in the processes of cultivation of *Bacillus subtilis*. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta* = Bulletin of the Technological University. 2018;21(1):193–195 (in Russian)

Критерии авторства

Хабибрахманов Р.Б., Мухачев С.Г. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Хабибрахманов Р.Б., Мухачев С.Г. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Contribution

Rinat B. Khabibrakhmanov, Sergey G. Mukhachev carried out the experimental work, analyzed the experimental results and prepared the text of the manuscript. Rinat B. Khabibrakhmanov, Sergey G. Mukhachev have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Хабибрахманов Ринат Басыйрович,
старший преподаватель кафедры
химической кибернетики факультета
пищевых технологий, аспирант,
Казанский национальный исследовательский
технологический университет,
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68,
Республика Татарстан, Российская Федерация,
✉e-mail: habib13@mail.ru

Мухачев Сергей Гарманович,
к.т.н., доцент кафедры химической
кибернетики факультета пищевых технологий,
Казанский национальный исследовательский
технологический университет,
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68,
Республика Татарстан, Российская Федерация,
e-mail: kznsoes@yandex.ru

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

AUTHORS' INDEX

Rinat B. Khabibrakhmanov,
Senior Lecturer,
Postgraduate Student,
Department of Chemical Cybernetics,
Kazan National Research
Technological University,
68, K. Marx St., Kazan 420015,
Republic of Tatarstan, Russian Federation,
✉e-mail: habib13@mail.ru

Sergey G. Mukhachev,
Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Department of Chemical Cybernetics,
Kazan National Research
Technological University,
68, K. Marx St., Kazan 420015,
Republic of Tatarstan, Russian Federation,
e-mail: kznsoes@yandex.ru