

УДК 532.54

## Экспериментальное исследование формирования вихревой структуры в газовихревом биореакторе\*

И.В. Наумов<sup>1</sup>, Р.Г. Геворгиз<sup>1,2</sup>, С.Г. Скрипкин<sup>1</sup>, Б.Р. Шарифуллин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь

E-mail: naumov@itp.nsc.ru

Проведено экспериментальное исследование формирования циркуляционных вихревых ячеек в жидкой среде газовихревого биореактора. Исследование выполнено в промышленном стеклянном биореакторе объемом 10 литров с диаметром реакторной емкости  $D = 190$  мм. Вихревое движение воздуха генерировалось лопастным колесом (активатором) при заполнении реакторной емкости на 50 и 80 % модельной средой. В качестве модельной среды использовался 65 % -й водный раствор глицерина с плотностью  $\rho = 1150$  кг/м<sup>3</sup> и с кинематической вязкостью  $\nu = 15$  мм<sup>2</sup>/с. Для наблюдения картины вихревого движения применялся метод цифровой трассерной визуализации (PIV). Показано, что при вращении активатора одновременно возникает меридиональное и циркуляционное движения жидкости. Определены закономерности вихревого движения модельной среды в зависимости от заполнения реактора и интенсивности вращения активатора. Выявлено, что под границей раздела возникают ячейки центробежной циркуляции, которые при увеличении частоты вращения активатора развиваются в глубь реактора. Установлено, что развитие центробежной циркуляции жидкости происходит аналогично тому, как это имеет место в замкнутом вихревом течении одной жидкости и в системе ограниченного вихревого движения двух несмешиваемых жидкостей.

**Ключевые слова:** гидродинамика, замкнутое вихревое течение, тепломассоперенос, вихревые биореакторы.

### Введение

Исследование режимов вихревых течений с целью их практического применения для интенсификации тепломассообменных процессов при разработке вихревых аппаратов в химических, биологических и энергетических технологиях является важнейшим направлением [1]. Во многих вихревых аппаратах наблюдается взаимодействие вращающейся рабочей жидкости с другой жидкостью или газом, например, при неполном заполнении реактора рабочей жидкостью [2–4]. Изучение особенностей вращательного движения несмешиваемых сред в таких условиях становится важной задачей как с точки зрения оптимизации работы действующих установок, так и для проектирования новых устройств, одним из которых является газовихревой биореактор.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (код проекта 19-19-00083).

Биореакторы являются одним из основных звеньев в процессе промышленного микробиологического синтеза [5], где их применяют для обеспечения оптимальных условий жизнедеятельности культивируемых сред. Важной особенностью газовихревых биореакторов является создание вихревых потоков, имитирующих движение естественной среды обитания микроорганизмов, что в значительной мере расширяет возможности получения интенсивных культур практически любых видов микроорганизмов в промышленных масштабах. Например, биомасса бентосных микроводорослей характеризуется высокой удельной плотностью, поэтому «тяжелые» клетки достаточно быстро оседают на дно [6]. Такая биологическая особенность бентосных микроводорослей не позволяет выращивать их в современных промышленных фотобиореакторах из-за недостаточной эффективности перемешивания культуральной среды и наличия у современных биореакторов гидродинамических теней (застойных зон), где оседают и скапливаются бентосные микроводоросли, т.е. нарушается главное условие интенсивного культивирования низших фототрофов — равномерное распределение клеток во всем рабочем объеме фотобиореактора.

В связи с развитием газовихревых биореакторов внимание исследователей привлекли двухжидкостные вращающиеся течения. Закрученный поток жидкости, прилегающей к вращающемуся диску, генерирует вихревое течение второй жидкости, которая не имеет прямого контакта с завихрителем [7]. В отличие от твердотельного вращения, где угловая скорость постоянна, а максимум линейной скорости находится на периферии диска, в случае жидкой вращающейся среды этого не наблюдается. В первых экспериментальных исследованиях, посвященных изучению структуры вихревого ограниченного движения двух несмешиваемых жидкостей, были определены закономерности развития ячеистой структуры течения [8], а также обнаружен осевой противоток (распад вихря) как в верхней [9], так и в нижней жидкости [10]. В работе [11] было показано, что важным отличием от случая с твердым диском является и то, что на границе раздела радиальная скорость не равна нулю, так как закручивающая жидкость сходится к оси цилиндра. В работе [12] исследовалась передача углового момента через границу раздела двух несмешиваемых жидкостей в длинном цилиндрическом контейнере с верхним вращающимся диском. Было установлено, что развитие центробежной циркуляции в нижней жидкости происходит так же, как и в случае одной жидкости. В первом экспериментальном исследовании закрученных течений в газовихревом реакторе [13] было показано, что, несмотря на различие плотности более чем на три порядка, сходящий к оси реактора спиральный воздушный поток формирует расходящееся вихревое движение модельной жидкой среды.

В настоящей работе определены закономерности организации вихревого течения рабочей жидкости в газовихревом биореакторе при различных параметрах вращения активатора.

### Экспериментальная установка и методика эксперимента

Работа посвящена изучению структуры вихревого движения жидкости в газовихревом биореакторе в режиме, при котором формируется мягкое ламинарное циркуляционное движение рабочей жидкости для выращивания биокультур, неустойчивых к неблагоприятным гидродинамическим условиям и требующих мягкого перемешивания.

Экспериментальное исследование проводилось в промышленном стеклянном цилиндрическом биореакторе «ГВ ФБР 10-И», изготовленном компанией «Центр вихревых технологий», объемом 10 литров с диаметром реакторной емкости  $D = 190$  мм и высотой  $h = 300$  мм (рис. 1). В реакторе перемешивание рабочей среды осуществлялось

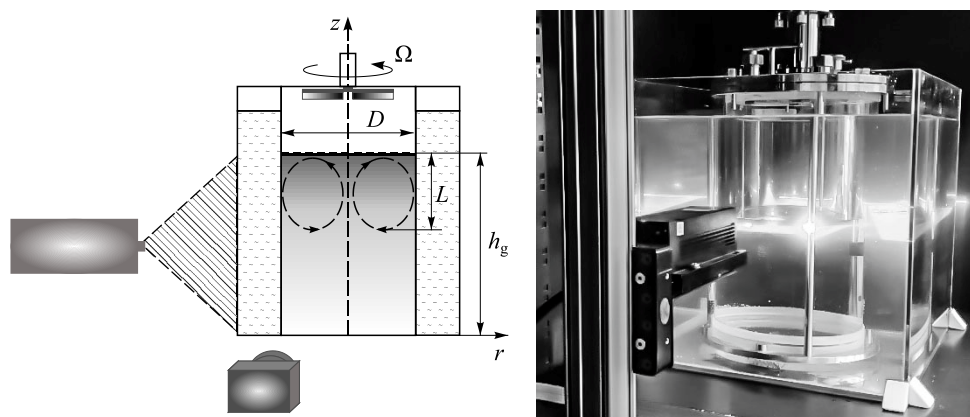


Рис. 1. Схема вихревого течения и фотография установки.

путем создания в ней квазистационарного вращательного движения, генерируемого закрученным потоком воздуха. Этот поток воздуха типа «торнадо» генерировался лопаточным колесом (активатором) над поверхностью рабочей жидкости. Составляющая более двух порядков разница в скорости воздуха и жидкости обеспечивала интенсификацию межфазного массообмена за счет высокой скорости движения аэрирующего газа и равномерного перемешивания жидкости без застойных зон. Благодаря такой закрутке аэрирующего газа, имеющей место вследствие трения на границе раздела фаз и разницы давлений между периферией и центром вихря, обеспечивалось движение модельной жидкости в виде вихревого кольца, вращающегося относительно оси емкости, с одновременным нисходящим движением жидкости на периферии ёмкости и восходящим — в приосевой зоне [14, 15].

При изучении топологии замкнутого вихревого течения использовалась установка для бесконтактных оптических методов исследования ограниченных закрученных течений, изображенная на рис. 1, где  $h_g$  — высота слоя жидкости,  $L$  — осевая протяженность ячейки циркуляции, схематически изображенная на рисунке под границей раздела (стрелки указывают направление движения потока). В качестве модельной жидкости использовался 65 % -й водный раствор глицерина, плотность которого  $\rho_g = 1150 \text{ кг/м}^3$ , а кинематическая вязкость  $\nu_g = 15 \text{ мм}^2/\text{с}$ . Индексом «г» обозначен водный раствор глицерина. Оптимальный рабочий диапазон вращения активатора, при котором отсутствуют колебания границы раздела, составляет  $\Omega = 150 - 1800 \text{ об/мин}$  при заполнении реакторной емкости на 50 % ( $h_g = 150 \text{ мм}$ ) и 80 % ( $h_g = 240 \text{ мм}$ ).

Для наблюдения картины вихревого движения применялся метод цифровой трассерной визуализации (PIV). Система PIV состояла из двухимпульсного Nd:YAG-лазера Beamtch Vlite-200 (длина волны 532 нм, частота 15 Гц, длительность импульса 10 нс, энергия импульса 200 мДж), CCD-камеры IMPERX IGVB2020 (8 бит на пиксель, разрешение матрицы 2056×2060 пикселей), оснащенной объективом AF Nikkor 28мм f/2.8D, и синхронизирующего процессора [14]. Расчет двумерных полей скорости проводился с помощью коммерческого программного обеспечения ActualFlow. Толщина лазерного ножа, образованного цилиндрической линзой, составляла около 0,8 мм в плоскости измерения. Поток жидкости засеивался полиамидными частицами плотностью 1030 кг/м<sup>3</sup> со средним размером частицы 10 мкм. Исследования проводились в вертикальном сечении,

проходящем через ось реактора, и в горизонтальном сечении под границей раздела на расстоянии 1 мм. Для уменьшения оптических aberrаций и термостабилизации газо-вихревой реактор помещался в стеклянный контейнер размером 300×300×400 мм.

### Экспериментальные результаты

Экспериментальное исследование структуры течения проводилось для нескольких стационарных режимов при  $\Omega = 360, 720, 1080, 1440$  и  $1800$  об/мин. При помощи метода PIV были получены и проанализированы поля скорости. Длина ячейки циркуляции, прилегающей к границе раздела, определялась по изображениям полей скорости в выделенном сечении, где треки от периферийного течения сходятся к оси, а осевая компонента скорости принимает нулевые значения на основной части горизонтального сечения. На рис. 2 приведены примеры полей скорости, демонстрирующей разворот течения и формирование восходящего потока вдоль оси цилиндра при  $\Omega = 720, 1800$  об/мин и  $h_g = 0,5h$ . Цветом обозначено значение осевой компоненты скорости. Для удобства на рисунке приведены половины полей скорости в жидкости, где левый край изображения соответствует оси реакторной емкости, а правый — периферии.

Как было показано в экспериментальном исследовании структуры замкнутого вихревого течения двух несмешиваемых жидкостей [12], при одной и той же длине ячейки циркуляции распределение тангенциальной скорости под границей раздела близко к распределению тангенциальной компоненты скорости под вращающимся диском. Наблюдается подобие в развитии ячеистой структуры в случаях одной и двух жидкостей, а число Рейнольдса нижней жидкости близко к числу Рейнольдса в случае одной жидкости.

Для определения числа Рейнольдса в рабочей модельной жидкости ( $Re_g$ ) биореактора было выполнено измерение тангенциальной ( $V_{tg}$ ) и радиальной ( $V_r$ ) компонент скорости в горизонтальном сечении под границей раздела при  $\Omega = 360, 720, 1080, 1440$  и  $1800$  об/мин. На рис. 3 представлены профили скорости при различных  $\Omega$ . Число Рейнольдса в данном случае определялось как  $Re = V_{tgm} R / \nu_g$ , где  $V_{tgm}$  — максимальное значение тангенциальной компоненты скорости,  $R$  — радиус реакторной емкости,  $\nu$  — кинематическая вязкость рабочей жидкости. В таблице представлены максимальные

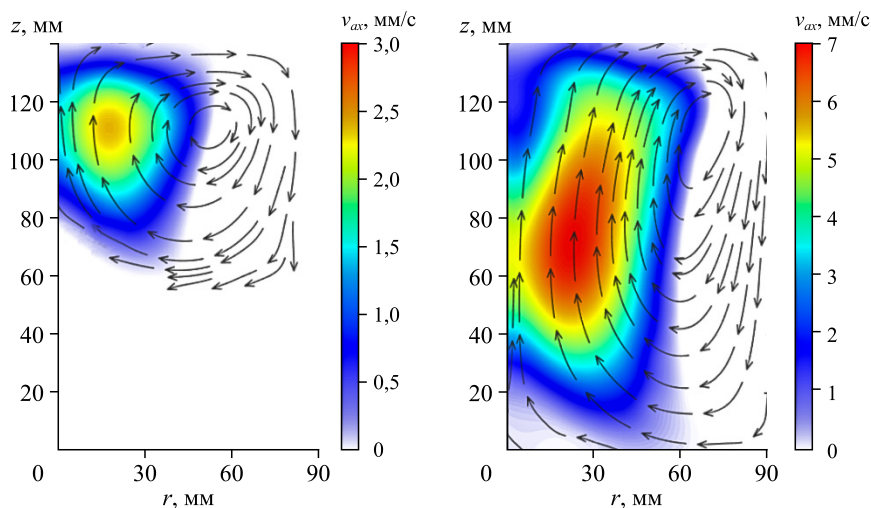


Рис. 2. Векторное поле скорости при  $\Omega = 720$  (слева) и  $1800$  (справа) об/мин.

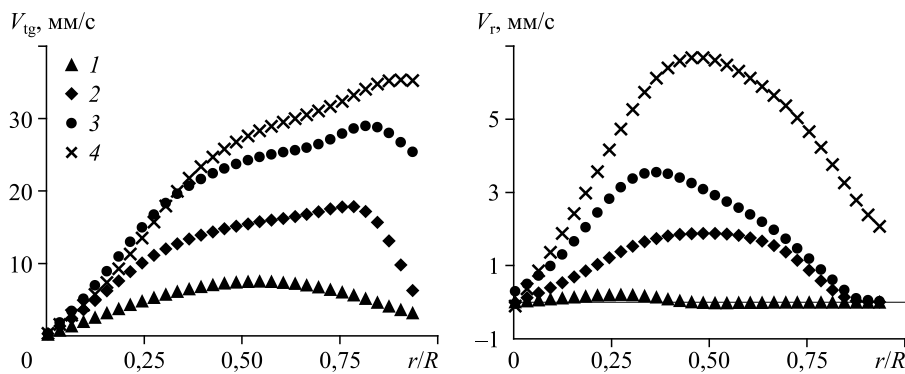


Рис. 3. Профили тангенциальной ( $V_{tg}$ ) и радиальной ( $V_r$ ) компонент скорости в жидкости на расстоянии 1 мм от границы раздела при  $h_g = 0,5h$ .

$\Omega = 360$  (1), 720 (2), 1080 (3), 1440 (4) об/мин.

значения измеренных тангенциальных скоростей ( $V_{tgm}$ ) в зависимости от частоты вращения активатора ( $\Omega$ ) при  $h_g = 0,5h$  и  $0,8h$ . По данным значениям были определены  $Re_g$ .

На рис. 4 представлена зависимость длины ячейки циркуляции жидкости ( $L$ ), нормированной на радиус цилиндра ( $R$ ), от числа Рейнольдса ( $Re$ ) в газовихревом биореакторе при  $h_g = 0,5h$  (1) и  $0,8h$  (2). Переход к безразмерным величинам показал, что данные биореактора при  $h_g = 0,5h$  и  $0,8h$  ложатся на одну прямую, полученную линейной аппроксимацией (3). Для сравнения на рис. 4 представлена зависимость распространения циркуляционного движения в одной жидкости (4) из работы [12]. Наблюдается соответствие данных, полученных в биореакторе и в цилиндрическом контейнере. Небольшая разница связана с тем, что закрутка потока происходит разными способами. В отличие от закрутки потока диском, где угловая скорость постоянна, а максимум линейной скорости находится на периферии диска, в случае закрутки потока газовым вихрем этого не наблюдается. Также важным отличием от случая твердого диска является и то, что на границе раздела радиальная скорость не равна нулю [11]. Анализ представленных на рис. 3 и 4 результатов показывает, что при увеличении частоты вращения активатора происходит сближение кривых. Это связано с приближением профиля тангенциальной компоненты скорости к форме профиля при твердотельном вращении (см. рис. 3).

Таблица

Максимальные значения тангенциальной скорости под границей раздела и число Рейнольдса в жидкости в зависимости от вращения активатора

| Активатор         | Высота слоя жидкости |              |                  |       |
|-------------------|----------------------|--------------|------------------|-------|
|                   | $h_g = 0,5h$         | $h_g = 0,8h$ |                  |       |
| $\Omega$ , об/мин | $V_{tgm}$ , мм/с     | Re           | $V_{tgm}$ , мм/с | Re    |
| 360               | 7,7                  | 48,8         | 9,7              | 61,3  |
| 720               | 18,1                 | 114,6        | 18,5             | 117,4 |
| 1080              | 29,2                 | 184,9        | 32,4             | 205,5 |
| 1440              | 36                   | 228          | 52,5             | 332,7 |
| 1800              | 46,8                 | 296,5        | 77,1             | 488,6 |

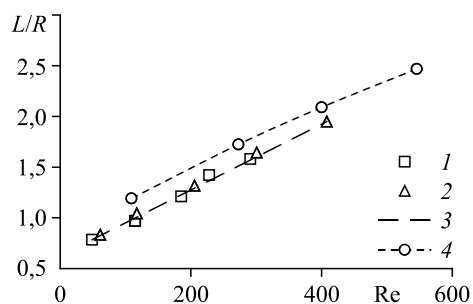


Рис. 4. Зависимость длины ячейки циркуляции под границей раздела.

1 —  $h_g = 0,5h$ , 2 —  $h_g = 0,8h$ ,  
3 — линейная аппроксимация,  
4 — в случае одной жидкости [12].

### Заключение

Проведено экспериментальное исследование вихревого течения жидкости в газо-вихревом биореакторе. Показано, что при вращении активатора в жидкости возникают меридиональное и циркуляционное течения.

Под границей раздела появляются ячейки центробежной циркуляции, которые при увеличении частоты вращения активатора увеличиваются вглубь реактора. Определены закономерности вихревого движения модельной среды в зависимости от ее объема и интенсивности вращения активатора. Установлено, что развитие центробежной циркуляции жидкости аналогично тому, как это происходит в замкнутом вихревом течении в случае одной жидкости и в нижней жидкости в системе двух закрученных несмешиваемых жидкостей [12].

Данные результаты представляют интерес для развития вихревых технологий, формирования вихревого движения рабочей жидкости без прямого механического контакта с закручивающим устройством с целью обеспечения мягкого (при небольших касательных напряжениях) и неинтрузивного (без пропеллера в рабочем объеме) перемешивания.

### Список литературы

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 590 с.
2. Savelyeva A.V., Nemudraya A.A., Podgorniy V.F., Laburkina N.V., Ramazanov Y.A., Repkov A.P., Kuligina E.V., Richter V.A. Analysis of the efficiency of recombinant escherichia coli strain cultivation in a gas-vortex bioreactor // *Biotechnology and Applied Biochemistry*. 2017. Vol. 64, Iss. 5. P. 712–718.
3. Fang S., Todd P.W., Hanley T.R. Enhanced oxygen delivery to a multiphase continuous bioreactor // *Chemical Engng Sci*. 2017. Vol. 170. P. 597–605.
4. Chaplina T.O. Experimental study of substance transfer in vortex and wave flows in multicomponent media // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*. 2019. P. 159–173.
5. 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. 117 с.
6. Gevorgiz R.G., Gontcharov A.A., Zheleznova S.N., Malakhova L.V., Alyomova T.E., Maoka T., Nekhoroshev M.V. Biotechnological potential of a new strain of *Cylindrotheca fusiformis* producing fatty acids and fucoxanthin // *Bioresource Technology Reports*. 2022. Vol. 18. P. 101098
7. Shtern V.N. Cellular flows. Topological metamorphoses in fluid mechanics: Cambridge: Cambridge University Press, 2018. 584 p.
8. Naumov I.V., Glavniy V.G., Sharifullin B.R., Shtern V.N. Formation of a thin circulation layer in a two-fluid rotating flow // *Physical Review Fluids*. 2019. Vol. 4, Iss. 5. P. 054702-1–054702-17.
9. Tsai J.-C., Tao C.-Y., Sun Y.-C., Lai C.-Y., Huang K.-H., Juan W.-T., Huang J.-R. Vortex-induced morphology on a two-fluid interface and the transitions // *Phys. Rev. E*. 2015. Vol. 92. P. 031002-1–031002-5.
10. Naumov I.V., Sharifullin B., Shtern V.N. Vortex breakdown in the lower fluid of a two-fluid swirling flow // *Physics of Fluids*. 2020. Vol. 32, No. 1. P. 014101-1–014101-16.
11. Naumov I.V., Sharifullin B.R., Tsoy M.A., Shtern V.N. Dual vortex breakdown in a two-fluid confined flow // *Physics of Fluids*. 2020. Vol. 32. P. 061706-1–061706-5.
12. Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В. Передача углового момента через границу раздела двух несмешиваемых жидкостей // *Теплофизика и аэромеханика*. 2021. Т. 28, № 1. С. 67–78.
13. Наумов И.В., Скрипкин С.Г., Шарифуллин Б.Р., Штерн В.Н. Исследование вихревого движения в газожидкостном биореакторе // *Процессы в геосредах*. 2021. № 3(29). С. 1242–1250.
14. Naumov I.V., Skripkin S.G., Shtern V.N. Counter flow slip in a two-fluid whirlpool // *Physics of Fluids*. 2021. Vol. 33, Iss. 6. P. 061705-1–061705-7.
15. Наумов И.В., Штерн В.Н. Двухэтажное торнадо // *Природа*. 2021. № 4. С. 12–19.

Статья поступила в редакцию 24 июня 2022 г.,  
после доработки — 24 июня 2022 г.,  
принята к публикации 2 сентября 2022 г.