

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНО- И МИКРОШЕРОХОВАТОСТЕЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА

© 2021 г. И. В. Наумов<sup>1,2,\*</sup>, Н. В. Окулова<sup>3</sup>,  
Б. Р. Шарифуллин<sup>1,2</sup>, В. А. Ломакина<sup>1</sup>, В. Л. Окулов<sup>1,4,\*\*</sup>

Представлено академиком РАН С.В. Алексеенко 22.01.2021 г.

Поступило 27.01.2021 г.

После доработки 27.01.2021 г.

Принято к публикации 01.02.2021 г.

Исследуется влияние наношероховатостей на структуру замкнутого вихревого потока, генерируемого в неподвижном вертикальном цилиндрическом контейнере верхним вращающимся диском с нанесением различных шероховатостей на его поверхность. Установлено, что при увеличении числа Рейнольдса наличие шероховатостей на вращающемся диске приводит к увеличению протяженности вдоль оси вихревой ячейки с циркуляционным движением, приводя к интенсификации перемешивания и массопереноса. Впервые показано, что для случая взаимодействия Венцеля жидкости с поверхностью (без “воздушной” прослойки между жидкостью и поверхностью) для наношероховатостей, моделирующих супергидрофобную поверхность листа лотоса, наблюдается 5–11%-ное увеличение размера вихревой ячейки. Полученные результаты представляют интерес для дальнейшего развития вихревых аппаратов и реакторов, обеспечивающих сложное вихревое движение ингредиентов, оптимизации работы действующих установок и для проектирования новых устройств.

*Ключевые слова:* наношероховатости, вихревое течение, вихревой реактор, массоперенос

DOI: 10.31857/S2686740021020061

Разработка вихревых аппаратов для улучшения тепломассообменных процессов в химических, биологических и энергетических технологиях является важнейшим направлением исследований для многих практических приложений [1]. Важным аспектом изменения режимов этих процессов становится увеличение передачи углового момента от вращающегося диска к рабочей жидкости. Здесь особый интерес представляет изучение решений, используемых в природе. Например, использование поверхностей, прототипом которых является самоочищающаяся супергидрофобная поверхность листьев лотоса. Структура поверхности листа лотоса была впервые

измерена Бартлотом в 1997 г. [2]. На рис. 1 показаны элементы, содержащиеся в структуре поверхности листа лотоса: впадины, микронаросты и нанотравяной узор. На поверхности листьев этого растения задерживается воздух, тем самым образуется “воздушная подушка” – режим Кассие [3], которая предотвращает проникновение частиц воды и увлажнение материала, отталкивает капли дождя и очищает поверхность. В основном на изучении этих свойств были сфокусированы исследования природных гидрофобных покрытий [4]. Очевидно, что определенный интерес представляет и оценка воздействия этих шероховатостей в течениях без “воздушной подушки” – режим Венциля [5]. В качестве модели для таких исследований используем замкнутый цилиндр, в котором течение жидкости формируется вращающимся торцом (диском) [6–9]. При вращении диска на жидкость действует центробежная сила. Под ее действием происходит отток жидкости вдоль крышки от оси к периферии; затем жидкость, вращаясь, опускается вниз вдоль стенок цилиндра и, разворачиваясь, сходится к оси, образуя центральный кольцевой вихрь с восходящим потоком у оси (рис. 2а). При увеличении угловой скорости вращения торца происходит уве-

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Inntold A/S, Хорсхольм, Дания

<sup>4</sup> Датский технический университет, Люнгбю, Дания

\*E-mail: [naumov@itp.nsc.ru](mailto:naumov@itp.nsc.ru)

\*\*E-mail: [vokulov@mail.ru](mailto:vokulov@mail.ru)



Рис. 1. Структура поверхности листа лотоса содержит впадины, микронаросты (столбики) и нанотравяной узор.

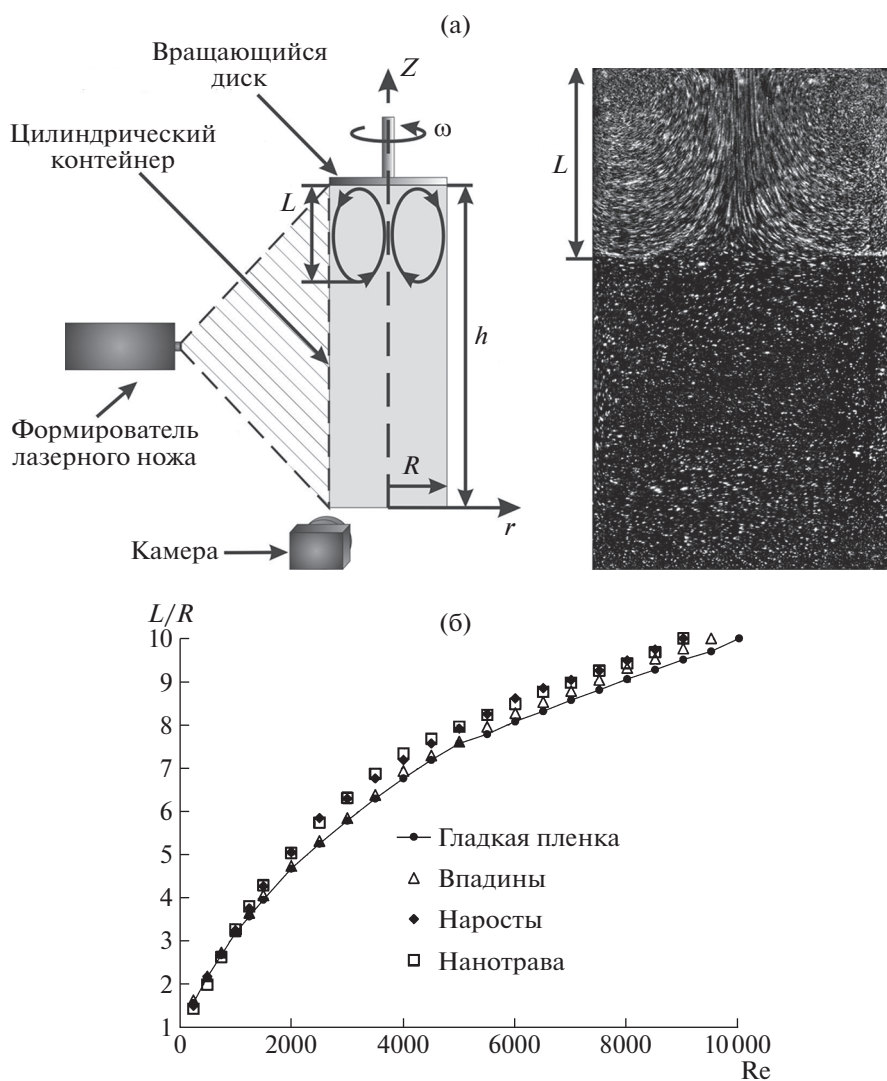


Рис. 2. Структура поверхности листа лотоса содержит впадины, микронаросты (столбики) и нанотравяной узор.

личение осевой протяженности вихревой ячейки вглубь цилиндра [6, 8]. Целью настоящей работы является исследование влияния наноструктурированной поверхности вращающегося торца на распространение вихревого потока в глубину цилиндра.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования топологии замкнутого вихревого течения с помощью бесконтактных оптических методов использовалась установка, изоб-

**Таблица 1.** Прирост осевой протяженности вихревой ячейки в процентах относительно гладкой пленки для различных типов шероховатостей

| Тип шероховатости | Впадины        | Наросты | Нанотрава |
|-------------------|----------------|---------|-----------|
| Re                | $\Delta L, \%$ |         |           |
| 1000              | 1.3            | 2       | 2.7       |
| 2500              | 1.2            | 11.3    | 9.3       |
| 4000              | 2.5            | 6.3     | 8.5       |
| 6000              | 2.5            | 6.6     | 6.2       |
| 8000              | 2.8            | 5.7     | 6.4       |

раженная на рис. 2а, где  $h$  – высота цилиндра,  $L$  – осевая протяженность циркуляционной ячейки, схематически изображенной под вращающимся диском (стрелки указывают направление движения потока). Исследование проводилось в длинном цилиндрическом контейнере радиуса  $R = 47$  мм и высотой  $h = 10R$ , выполненном из оргстекла оптического качества, с верхним вращающимся торцом. Контейнер заполнялся 66%-м водным раствором глицерина. Плотность и кинематическая вязкость при комнатной температуре (22.6°C) составляла 1170 кг/м<sup>3</sup> и 11.3 мм<sup>2</sup>/с соответственно. Для устранения оптических аберраций и термостабилизации цилиндр помещался в стеклянный прямоугольный контейнер, заполненный водой [7–9]. Вихревое движение жидкости генерируется верхним диском, который вращается с угловой скоростью  $\omega$ , в то время как другие стенки контейнера неподвижны. Интенсивность вихревого движения характеризуется числом Рейнольдса  $Re = \omega R^2/\nu$ , где  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости. Так как вязкость жидкости зависит от температуры, температура контролировалась в течение эксперимента. Температура изменялась не более чем на 0.3°C. При этом изменение температуры даже на 1°C дает погрешность на уровне 2% при  $Re = 2000$ .

Изучение топологии вихревого движения проводилось методом визуализации течения в вертикальном сечении, проходящем через ось цилиндра, с помощью лазерного “ножа” толщиной 1 мм. В качестве светорассеивающих добавок использовались полиамидные частицы нейтральной плавучести с диаметром 10 мкм. Глубина проникновения завихренности определялась визуально по изображениям адаптивной трековой системы с вычитанием внешнего фона и осреднении по нескольким изображениям для высокой контрастности [7, 9] в выделенном вертикальном осевом сечении, где треки от периферийного течения сходятся к оси. На вращающийся диск наносились пленки с различными шероховатостями: углубления шириной и глубиной 20 мкм (впа-

дины), возвышения с цилиндрами диаметра 5 мкм и высотой порядка 2 мкм (наросты), равномерная шероховатость с нанотравяным узором (нанотрава). В ходе эксперимента проведено измерение вихревой ячейки для случая гладкой пленки для сравнения влияния структурированной поверхности на распространение закрутки в глубину цилиндра.

Для того чтобы исключить влияние пузырьков воздуха в структурированных поверхностях, было проведено исследование выхода потока на режим Венцеля. При вращении диска воздух вымывается из структур полностью за 1–3 мин, т.е. воздух при погружении пленки вымывался значительно раньше, чем происходил выход потока на режим измерений (более 4 мин).

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2б показана зависимость длины ячейки циркуляции жидкости  $L$ , нормированной на радиус цилиндра, от числа Рейнольдса при различных наноструктурах на поверхности вращающегося диска. Наблюдается одинаковая тенденция в увеличении распространения вихревой ячейки вглубь цилиндра для всех типов исследуемых покрытий, что указывает на минимальное влияние случайных ошибок. Показано, что наличие шероховатостей увеличивает осевую протяженность циркуляционной ячейки. В случае пленки с шероховатостью типа “впадины” (линии 20 мкм) эффект незначителен, практически отсутствует при малых и умеренных  $Re$ , но при увеличении числа Рейнольдса проявляется, как и в случае других шероховатостей. Наличие микронаростов и нанотравяного узора усиливает эффект увеличения размера вихревой ячейки. В табл. 1 приведено сравнение прироста осевой протяженности вихревой ячейки в процентах относительно гладкой пленки для различных типов шероховатостей:  $\Delta L(Re) = \frac{(L(Re) - L_{гл}(Re))}{L_{гл}} \cdot 100$ , где  $L$  – длина измеряемой ячейки, и  $L_{гл}$  – длина ячейки при гладкой пленке. При числах Рейнольдса 250–10000 эффект наличия наношероховатостей дает прирост осевой протяженности вихревой ячейки до 11%. Как видно из рис. 2б и табл. 1, наибольший прирост происходит при  $Re$  от 2000 до 4000. Результаты показывают, что наибольший эффект увеличения длины ячейки наблюдается для случая наноразмерных шероховатостей (нанотрава).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование интенсификации вихреобразования при использовании различных типов наноструктурированной поверхно-

сти закручивающего диска, генерирующего вихревую структуру в замкнутом цилиндрическом контейнере. В качестве наноструктурированных поверхностей использовались элементы, моделирующие реальную супергидрофобную поверхность листьев лотоса (нанотрава, впадины и микроноросты). С помощью визуализации течения при различных параметрах крутки верхнего торца цилиндра определены закономерности организации вихревого течения, в зависимости от структуры поверхности вращающегося диска.

Впервые был обнаружен 5–11% -ный прирост осевой протяженности вихря (табл. 1) за счет эффекта нанощероховатостей для потоков Венцеля, при отсутствии воздушной прослойки между жидкостью и поверхностью.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации (соглашение № 075-15-2019-1923).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shtern V.N.* Cellular Flows. Topological Metamorphoses in Fluid Mechanics. N.Y.: Cambridge University Press, 2018. 573 p.
2. *Barthlott W., Neinhuis C.* Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces // *Planta*. 1997. V. 202. № 1. P. 1–8.
3. *Cassie A.B.D.* Contact angles // *Discussions of the Faraday society*. 1948. V. 3. P. 11–16.
4. *Webb H.K., Crawford R.J., Ivanova E.P.* Wettability of natural superhydrophobic surfaces // *Advances in colloid and interface science*. 2014. V. 210. P. 58–64.
5. *Wenzel R.N.* Resistance of solid surfaces to wetting by water // *Industrial & Engineering Chemistry*. 1936. V. 28. № 8. P. 988–994.
6. *Hills C.P.* Eddies induced in cylindrical containers by a rotating end wall // *Physics of Fluids*. 2001. V. 13. № 8. P. 2279–2286.
7. *Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В.* Передача углового момента через границу раздела двух несмешиваемых жидкостей // *Теплофизика и аэромеханика*. 2021. Т. 28. № 1. С. 67–79.
8. *Naumov I.V., Sharifullin B.R., Kravtsova A.Y., Shtern V.N.* Velocity jumps and the Moffatt eddy in two-fluid swirling flows // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2020. V. 116. P. 110116.
9. *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. V. 32. № 6. P. 061706.

## EXPERIMENTAL STUDY OF EFFECT OF NANO- AND MICROROUGHNESS ON INTENSITY OF SWIRLED FLOW

I. V. Naumov<sup>a,b</sup>, N. V. Okulova<sup>c</sup>, B. R. Sharifullin<sup>a,b</sup>,  
V. A. Lomakina<sup>a</sup>, and V. L. Okulov<sup>a,d</sup>

<sup>a</sup> *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Inmold A/S, Horsholm, Denmark*

<sup>d</sup> *Department of Wind Energy, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark*

Presented by Academician of the RAS S.V. Alekseenko

The work examines the effect of nano-roughness on the structure of a closed vortex flow generated in a closed vertical cylindrical container with an upper rotating end — a disk, with various roughness applied to the rotating disk. When the disk rotates on the liquid, a centrifugal force begins to act, which leads to the centrifugal circulation of the liquid. The presence of roughness on the rotating disk leads to an increase in the axial extent of the vortex cell with an increase in the Reynolds number, thus leading to an intensification of mixing and mass transfer. For the first time, due to the influence of nano-roughness modeling the superhydrophobic surface of the lotus sheet, there is a 5–11% increase in the intensity of the vortex cell for the case of Wenzel flows (without an air layer between the liquid and the nano-surface). The obtained results are of interest for further development of vortex apparatus and reactors providing complex vortex motion of ingredients, optimization of operation of existing plants and for design of new devices.

*Keywords:* nano-roughness, vortex flow, vortex reactor, mass transfer