

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-349-356

VORTEX FLOWS IN THE SHIP'S SYSTEMS AND DEVICES

A. G. Gorobets

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Liquid or gas flows in pipeline and other ship systems are usually vortex for natural reasons. Artificial twisting is used to intensify the various technological processes. At the same time, their hydrodynamic characteristics and impact on the processes require the further study. The experiments during which the phenomenon of transformation (separation) of the vortical flow in the cellular lattice is being researched have been conducted. It has been discovered that a vortical flow which goes through the lattice transforms into a system of vortical flows which retain their characteristics after they have gone through the lattice. The interaction of the transformed flows leads to the formation of the stable dynamic structure composed of the main vortexes and the satellite vortexes. This flow has all the advantages of the vortical flow but has a lower index of hydrodynamic resistance. The fact of the lower resistance of the transformed vortical flow as compared the vortical flow that is not divided and a smaller angle of opening the flow in water and gas indicates the existence of an internal structure and increased stability of the transformed flow. The vortical flows of liquid or gas are used to efficiently bring the heat from the heat-generating assemblies of ship's nuclear reactors, in the ventilation systems and air conditioning systems of ramified and narrow ship's compartments. Besides, the vortical movement of liquid and gas flows occurs in all pipeline systems when the liquid and gas flow through the holes or nozzles. The results obtained in the paper allow us to provide a new explanation of the behavior and characteristics of liquid and gas vortical flows passing through cellular lattices. Use of swirling and transformed flows of liquid and gas can improve the performance and quality of many systems connected with the liquid and gas movement, including reducing their hydrodynamic noise.

Keywords: vortical flow, vortex, separator, transformation of the vortical flow, Theorem of Helmholtz, vortex structure, mass transfer, heat transfer, hydrodynamic resistance, stability of the flow.

For citation:

Gorobets, Alexander G. "Vortex flows in the ship's systems and devices." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 349–356. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-349-356.

УДК 532.517.4

ВИХРЕВЫЕ ПОТОКИ В СУДОВЫХ СИСТЕМАХ И УСТРОЙСТВАХ

А. Г. Горобец

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Изучены потоки жидкости или газа в трубопроводных и иных судовых системах, обычно являющиеся вихревыми по естественным причинам. Отмечается, что искусственная закрутка используется для интенсификации различных технологических процессов. При этом их гидродинамические характеристики и влияние на происходящие процессы требуют дальнейшего изучения. Исследуется явление трансформации закрученных потоков жидкости и газа в ячеистых пространственных решетках. Экспериментально установлено, что пройдя через пространственную решетку, закрученный поток превращается в систему вихревых потоков, которые после выхода из решетки сохраняют свою индивидуальность. Взаимодействие между ними приводит к образованию устойчивой динамической структуры в виде основных вихрей и вихрей сателлитов. Такой поток сохраняет все преимущества закрученного потока, но обладает меньшим гидродинамическим сопротивлением. Обнаруженный эффект сни-

жения гидродинамического сопротивления трансформированных закрученных потоков, по сравнению с нетрансформированными потоками, свидетельствует о наличии внутренней структуры и большей устойчивости этого потока. Закрученные потоки жидкости или газа используются для эффективного отвода тепла от тепловыделяющих сборок корабельных атомных реакторов в системах вентиляции и кондиционирования разветвленных и затесненных судовых помещений. Кроме того, вихревое движение потоков жидкости и газа имеет место во всех трубопроводных системах при истечении жидкости или газа через отверстия или насадки. Результаты, полученные в данной работе, позволяют по-новому объяснять поведение и свойства закрученных потоков жидкости и газа при их прохождении через пространственные решетки. Использование закрученных и трансформированных потоков жидкости и газа позволяет повысить производительность и качество многих систем, связанных с движением жидкости и газа, в том числе снизить их гидродинамический шум.

Ключевые слова: закрученный поток, разделитель, трансформация потока, теорема Гельмгольца, вихревая структура, массоперенос, теплопередача, гидродинамическое сопротивление, устойчивость потока.

Для цитирования:

Горобец А. Г. Вихревые потоки в судовых системах и устройствах / А. Г. Горобец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 349–356. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-349-356.

Введение (Introduction)

Стремительное развитие индустрии и транспорта формируют повышенный интерес исследователей к изучению течений жидкости и газа с хаотическими режимами адвекции. В работах [1]–[4] изучается эволюция завихренности и скорость ее переноса на основе теоремы Гельмгольца и уравнения Навье – Стокса с использованием метода дискретных вихрей. Такие режимы течения представляют значительный практический интерес для инженерных приложений, связанных с движением жидкости в трубопроводах, гидродинамикой затопленных потоков, с использованием гидрореактивных движителей судов, процессами теплопередачи и охлаждения.

Открытие явления детерминированного хаоса позволило многим исследователям посмотреть на проблему адвекции жидкости с новых концептуальных позиций. При этом вопрос о достоверности критериев детерминированного хаоса при идентификации интенсивных режимов адвекции выделенных объемов жидкости является актуальным. Известна задача выравнивания распределения скоростей потока в канале с целью улучшения характеристик технологических аппаратов, которая была систематически исследована, например, в источниках [5], [6]. В частности, в этих работах был рассмотрен случай выравнивания скоростей потока с помощью рассредоточенного по сечению сопротивления (сетки, решетки) при «боковом вводе потока в аппарат». В данном случае имеет место закрутка потока, наблюдаемая с помощью шелковинок.

В работах [7]–[9] рассматривается задача выравнивания поля скоростей на входе в активную зону ядерного реактора из коллектора напорной камеры — входного коллектора. По мнению авторов этих работ, устранение закрутки и выравнивание потока достигаются путем установки за тонкостенной решеткой спрямляющей ячейковой решетки или специального раскручивающего аппарата — «рассекателя» в виде пакета параллельных пластин. Во входном коллекторе возникает закрутка потока теплоносителя (центральный вихрь, входной вихрь в форме стабильного — *торового*), что приводит к неравномерности в распределении потока теплоносителя. Обеспечение рационального распределения потока по каналам зоны достигается с помощью гидравлического профилирования — установки локальных сопротивлений на входе в тепловыделяющие сборники. Потоки в ячейках пространственных решеток и каналах активных зон реакторов считались незакрученными, т. е. «раскрученными».

На основании выводов, сделанных в работах [7]–[9], существовало мнение о том, что закрученный поток можно раскрутить с помощью ячейковой решетки, или «рассекателя». В настоящем исследовании впервые обнаружено явление трансформации закрученного потока с помощью ячейковой пространственной решетки в систему закрученных потоков, что соответствует первой теореме Гельмгольца о вихрях. Закрутка потока, подводимого к каналу какого-либо аппарата,

может быть естественной, обусловленной, например, несимметричным подводом потока, или искусственной, осуществляемой, например, с помощью лопаточного завихрителя. Если на пути такого потока установить ячеистую пространственную решетку типа сотовой структуры или в виде пучка продольно обтекаемых стержней тепловыделяющей сборки ядерного реактора, то единый закрученный поток разделяется решеткой на систему закрученных потоков. В каждую ячейку при этом вносится завихрение, которое и вызывает закрутку потока в каждой ячейке.

Результаты, полученные в данной работе, позволяют по-новому объяснять поведение и свойства трансформированных закрученных потоков после их прохождения через пространственную ячеистую решетку и использовать их для совершенствования судовых систем и устройств.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Опыты проводились на гидроаэродинамических стендах, один из которых показан на рис. 1. При разработке стенда были учтены рекомендации источников [10]–[13] и др.

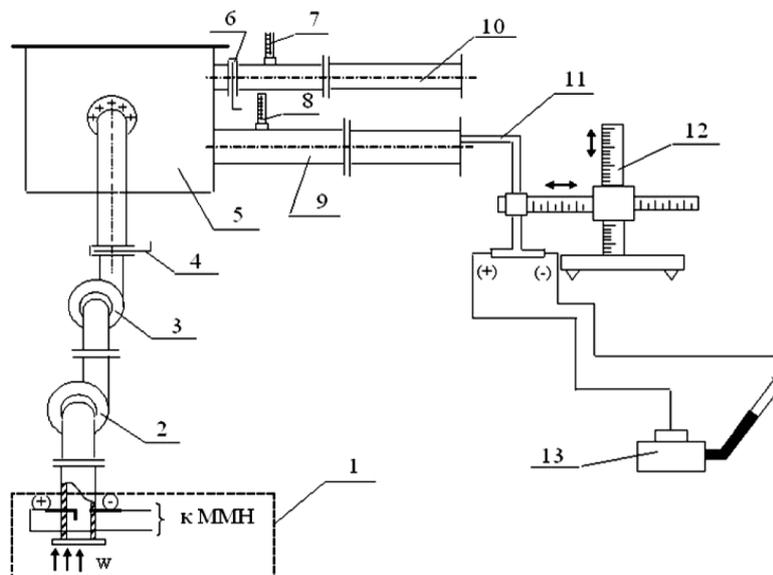


Рис. 1. Гидроаэродинамический стенд

Воздух из помещения лаборатории через расходомер 1 подается вентиляторами 2, 3 в бак 5, из которого воздух поступает в один из каналов 9, 10. Другие элементы рабочего участка: 4, 6 — регулирующие заслонки; 7, 8 — термометры; 11 — напорная трубка Пито – Прандтля с наружным диаметром рабочей части 6 мм; 12 — координатник двухосевой, позволяющий перемещать напорную трубку с шагом в 1 мм и приспособленный для использования микрометрической головки с шагом в 0,1 мм; 13 — микроманометр типа ММН.

Наблюдения могут проводиться на самих каналах или присоединяемых к ним исследуемых рабочих участках. Основные результаты были получены на рабочем участке (рис. 2), присоединяемом к аэродинамическому стенду. Рабочий участок на рис. 2 представляет собой стеклянный канал 1 и цилиндрическую вставку 4 для наблюдения характера течения с помощью шелковинок, закрепленных на струнах. Цифрами 2 и 3 на рабочем участке обозначены, соответственно, лопаточный завихритель и разделитель, число секторов которого варьировалось. Вдоль канала расположены патрубки для измерения перепада давлений 5.

Измерения гидравлических характеристик осуществлялись пневмометрическим методом с использованием микроманометров типа ММН. Частотные характеристики течений измерялись с помощью строботометра SWM-2 типа 7179/220 FNr-122 (*Hofman Electronic und Maschinen GMB, Darmstadt, Germany*). Акустические измерения выполнены с использованием аппаратуры фирмы *Bruel & Kjaer*.

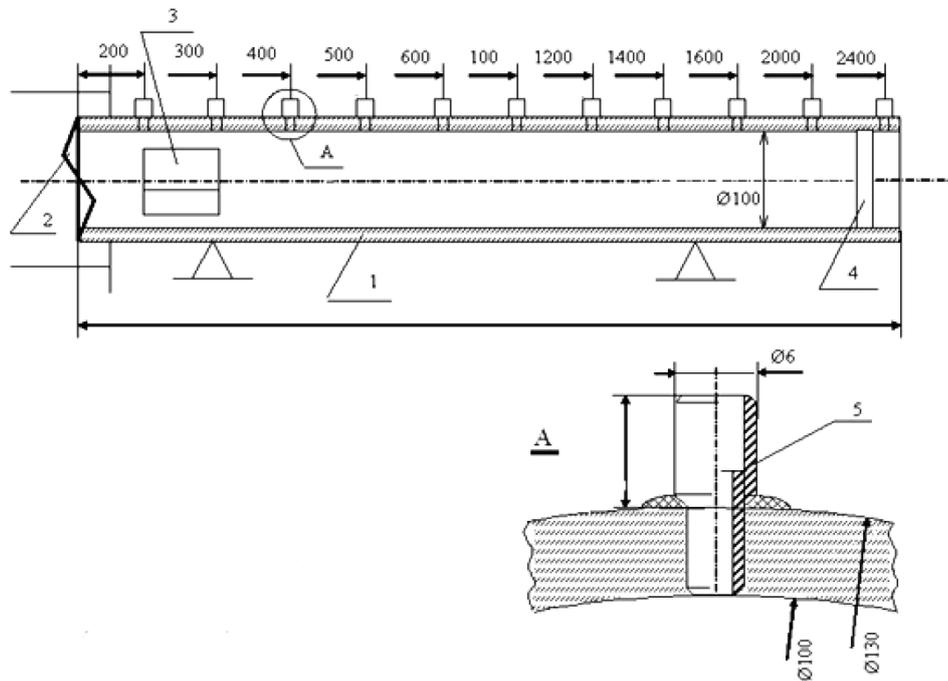


Рис. 2. Стекланный канал для визуальных наблюдений и измерений перепадов давления

Результаты (Results)

Результаты наблюдениями на рабочем участке при использовании разделителей с числом секторов $z = 2$ и 3 приведены в таблице. Установлено, что частоты потоков в секторах больше частоты набегающего потока, их величины зависят от количества секторов и возрастают по мере увеличения расхода или числа Рейнольдса.

Зависимость частот от числа секторов и числа Рейнольдса

Количество секторов разделения z	Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Число Рейнольдса, $\text{Re} \cdot 10^{-4}$	Частота f , Гц
Разделитель отсутствует $z = 0$	205	6,03	7,50
	240	7,09	10,0
	266	7,83	11,7
	282	8,25	14,2
$z = 2$	205	6,03	11,7
	240	7,09	13,3
	266	7,83	16,7
	282	8,36	18,3
$z = 3$	166	4,65	15,8
	200	5,82	18,7
	240	7,09	20,8
	266	7,83	23,3
	286	8,36	25,0

Полученные данные свидетельствуют о том, что трансформация закрученного потока в многоячейчатой пространственной решетке имеет место, при этом частота потоков в ячейках более чем в два раза превосходит частоту потоков у набегающего потока.

Вихревая структура потока после разделителя с тремя секторами показана на рис. 3. Здесь заштрихованные фигуры — основные вихревые потоки, выходящие из секторов разделителя, остальные фигуры — вихри-сателлиты.

Гидравлическое сопротивление потока в канале за пространственной решеткой ниже, чем сопротивление закрученного потока перед решеткой. Это сказывается на уровне гидродинамического шума, создаваемого потоками. Указанные эффекты обусловлены взаимодействием вихрей в потоке.

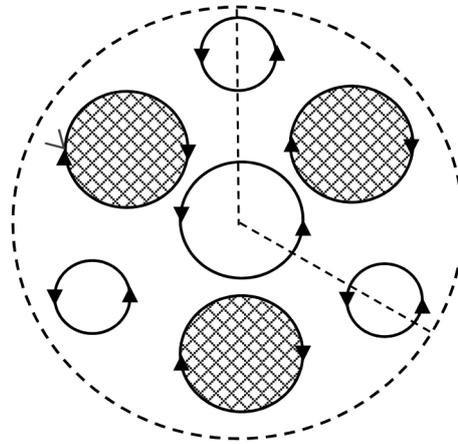


Рис. 3. Вихревая структура потока после разделителя с тремя секторами

Экспериментально установлено снижение гидравлического сопротивления закрученного и трансформированного потока, что обусловлено возникновением и функционированием сложной вихревой структуры, включающей основные вихри и вихри-спутники. Гидродинамические характеристики закрученного и трансформированного потоков представлены на рис. 4 и 5.

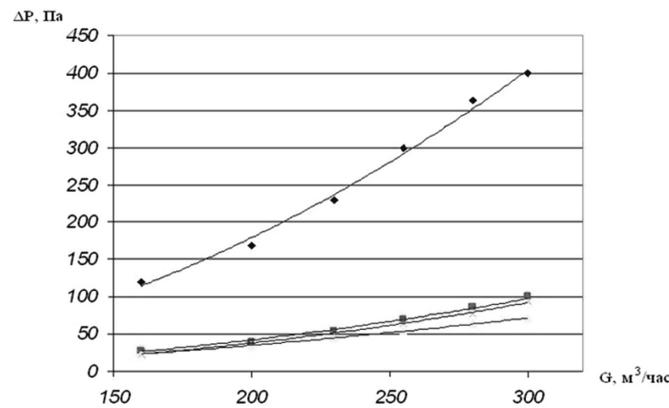


Рис. 4. Перепад давлений в рабочем участке: \blacklozenge — установлен только завихритель; \times — отсутствует завихритель и разделитель; \blacksquare — три сектора; \triangle — четыре сектора

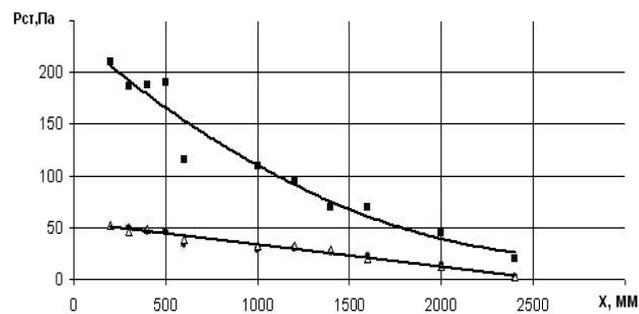


Рис. 5. Распределение статического давления вдоль канала диаметром 100 мм при расходе $G = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$: \triangle — пустая труба; \bullet — установлен завихритель и разделитель; \blacksquare — установлен только завихритель

Гидродинамические характеристики потоков при разделителях с двумя–четырьмя секторами близки к характеристике незакрученного потока. При этом гидравлическое сопротивление закрученного, но не трансформированного потока существенно выше аналогичного у потока, трансформированного с помощью трехсекторного разделителя. Сопротивление последнего практически совпадает с таковым у незакрученного потока.

Обсуждение (Discussion)

Гидродинамика многовихревого закрученного потока, образовавшегося при трансформации, имеет ряд существенных особенностей. После выхода из решетки сформированные в ячейках потоки сохраняют индивидуальность, взаимодействуя друг с другом. При их течении в канале в потоке возникает сложная вихревая структура, состоящая из основных потоков и вращающихся между ними вихрей-сателлитов. Между вихрями происходит энергообмен, который приводит к изменениям их поперечных размеров при движении по каналу. Число крупных вихрей-сателлитов больше числа основных вихрей, а направление их вращения обратно таковому у основных.

Факт трансформации закрученных потоков наблюдался визуально. Для этого использовалась шелковинка, вводимая в поток. Частота вращения закрученных потоков в ячейках выше, чем частота в потоке перед решеткой, что соответствует закону сохранения момента количества движения. Гидравлическое сопротивление потока в канале за пространственной решеткой ниже, чем сопротивление закрученного потока перед решеткой. Это сказывается и на уровне гидродинамического шума, создаваемого потоками. Отмеченные эффекты обусловлены взаимодействием вихрей в потоке.

Обнаруженный эффект снижения сопротивления трансформированного потока по сравнению с нетрансформированным закрученным потоком свидетельствует о наличии внутренней структуры и большей устойчивости этого потока. В пользу этого предположения свидетельствует и зафиксированный, меньший по сравнению с нетрансформированным потоком, угол раскрытия многовихревого потока после выхода из канала.

Наблюдениями свободной затопленной струи, выходящей из канала, установлено следующее:

- расширение закрученной струи в отсутствие разделителя существенно больше, чем незакрученной, угол расширения для незакрученной струи в проведенных измерениях был в два раза меньше;
- расширение закрученной струи при наличии разделителя с тремя секторами такое же, как у незакрученной, соответственно, разделение закрученной струи с помощью разделителя, установленного в сопло, увеличивает ее устойчивость и уменьшает диссипацию.

Таким образом, трансформированные закрученные потоки, сохраняя все достоинства закрученных потоков, обладают лучшими гидродинамическими характеристиками.

Заключение (Conclusion)

Результаты проведенных в исследовании наблюдений изменяют представления о гидродинамике закрученных потоков при их движении через ячейчатые пространственные решетки, изложенные в работах [5], [6], [9], [13]. Полученные в них экспериментальные результаты объясняются явлением трансформации закрученного потока в систему взаимодействующих закрученных потоков, а не его «раскруткой».

Результаты проведенных исследований могут иметь следующие области технического применения:

- совершенствование гидроаэродинамических характеристик течения в трубопроводных системах путем использования явления трансформации закрученных потоков, которые отличаются низким гидравлическим сопротивлением, высокими показателями теплообмена, лучшими акустическими и вибрационными характеристиками;

– создание форсированных теплообменных аппаратов и тепловыделяющих сборок ядерных реакторов [14];

– совершенствование процессов истечения различных сред через насадки, отличающиеся тем, что в них используется явление трансформации закрученного потока [15];

– создание систем вентиляции затесненных помещений, отличающихся высокой эффективностью, лучшими гидравлическими и акустическими характеристиками;

– создание и совершенствования вихревых движителей водных и воздушных судов [16]–[18], которые в случае надводных судов дают конструкции преимущества по затратам мощности при перемещении по воде.

Некоторые из этих результатов нашли свое применение на судах северного флота для совершенствования судовых систем и устройств.

Работа проводилась в 2010–2014 гг. при поддержке ФГУП «Крыловский государственный научный центр» под руководством В. С. Никитина. Автор статьи выражает глубокую признательность Е. М. Аину, зав. кафедрой инженерной защиты окружающей среды филиала СПбГМТУ в г. Северодвинске, за многолетнюю совместную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков В. В. Эволюция завихренности в жидкости и газе / В. В. Марков, Г. Б. Сизых // Известия Российской Академии наук. Механика жидкости и газа. — 2015. — № 2. — С. 8–15.

2. Сизых Г. Б. Метод добавления завихренности / Г. Б. Сизых // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2016. — № 3. — С. 26–31. DOI: 10.7868/S0568528116030130.

3. Yin J. Measurement on the flow structure of a gas-liquid separator applied in TMSR / J. Yin, Y. Qian, T. Zhang, D. Wang // Annals of Nuclear Energy. — 2019. — Vol. 126. — Pp. 20–32. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.11.009.

4. Ahmadi F. Particle image and tracking velocimetry of solid-liquid turbulence in a horizontal channel flow / F. Ahmadi, M. Ebrahimian, R. S. Sanders, S. Ghaemi // International Journal of Multiphase Flow. — 2019. — Vol. 112. — Pp. 83–99. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.12.007.

5. Идельчик И. В. Аэрогидродинамика технологических аппаратов (подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов) / И. В. Идельчик. — М.: Машиностроение, 1983. — 351 с.

6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. — М.: Книга по требованию, 2012. — 466 с.

7. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике: в 3 т. / Сост. и ред. П. Л. Кириллов. — М.: ИздАТ, 2010–2014. — 686 с.

8. Гидродинамика и безопасность ядерных энергетических установок: сб. трудов ФЭИ: в 3 т. М.: — Изд-во ГНЦ ФФЭИ, 1999. — 675 с.

9. Лепеш Г. В. Повышение эффективности теплообменных аппаратов путем применения вихревого эффекта / Г. В. Лепеш, А. Г. Лепеш, С. К. Лунева // Техничко-технологические проблемы сервиса. — 2016. — № 4 (38). — С. 23–31.

10. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. — М.: Энергия, 1978. — 704 с.

11. Пат. 2270374 Российская Федерация, МПК F15D 1/04. Способ трансформации потоков, 2006 / Е. М. Аин, А. В. Агеев, А. Г. Горобец [и др.]; Заяв. и патентообл. ФГУП «Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «Онега»». — № 2004119634/06; заявл. 28.06.2004; опубл. 20.02.2006, Бюл. № 5.

12. Повх И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И. Л. Повх. — Л.: Машиностроение, 1974. — 480 с.

13. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции / В. Н. Талиев. — М.: Стройиздат, 1979. — 295 с.

14. Митрофанова О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок / О. В. Митрофанова. — М.: Физматлит, 2010. — 287 с.

15. Zhou C. Dynamic analysis for two-phase vortex flow and optimization of vortex tools to unload liquid from gas wells / C. Zhou, X. Wu, T. Zhang, X. Zhao, S. Gai, H. Xiang // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2019. — Vol. 173. — Pp. 965–974. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.10.091.

16. Никитин А. В. Вихрь и вихревые движители / А. В. Никитин. — М.: Академия тринитаризма, 2007. — Эл. №77–6567.

17. Остроухов Н. Н. Вихревые движители водных и воздушных судов / Н. Н. Остроухов, Е. В. Чумакова // Мир транспорта. — 2016. — Т. 14. — № 6 (67). — С. 86–96.
18. Liu M. Cavitation–vortex–turbulence interaction and one-dimensional model prediction of pressure for hydrofoil ALE15 by Large Eddy Simulation / M. Liu, L. Tan, S. Cao // Journal of Fluids Engineering. — 2019. — Vol. 141. — Is. 2. — Pp. 021103. DOI: 10.1115/1.4040502.

REFERENCES

1. Markov, V. V., and G. B. Sizykh. “Vorticity evolution in liquids and gases.” *Fluid Dynamics* 50.2 (2015): 186–192. DOI: 10.1134/S0015462815020027.
2. Sizykh, G. B. “Vorticity addition method.” *Fluid Dynamics* 51.3 (2016): 321–326. DOI: 10.1134/S0015462816030030.
3. Yin, Junlian, Yalan Qian, Tingting Zhang, and Dezhong Wang. “Measurement on the flow structure of a gas-liquid separator applied in TMSR.” *Annals of Nuclear Energy* 126 (2019): 20–32. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.11.009.
4. Ahmadi, Farzad, Masoud Ebrahimian, R. Sean Sanders, and Sina Ghaemi. “Particle image and tracking velocimetry of solid-liquid turbulence in a horizontal channel flow.” *International Journal of Multiphase Flow* 112 (2019): 83–99. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.12.007.
5. Idel’chik, I. V. *Aerogidrodinamika tekhnologicheskikh apparatov (Podvod, otvod i raspredelenie potoka po secheniyu apparatov)*. M.: Mashinostroenie, 1983.
6. Idel’chik, I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam*. M.: Kniga po Trebovaniyu, 2012.
7. Kirillov, P. L., eds. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam v yadernoi energetike [v 3t.]*. 2014.
8. *Gidrodinamika i bezopasnost’ yadernykh energeticheskikh ustanovok. Sbornik trudov FEI. V trekh tomakh*. GNTs FFAEI, 1999.
9. Lepesh, G. V., A. G. Lepesh, and S. K. Luneva. “Increase in efficiency of heatexchange devices by use of vortex effect.” *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa* 4(38) (2016): 23–31.
10. Preobrazhenskii, V. P. *Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory*. M: Energiya, 1978.
11. Ain, E. M., A. V. Ageev, A. G. Gorobets, et al. RU 2 270 374 C1, IPC F 15 D 1/04. Sposob transformatsii potokov. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2006.
12. Povkh, I. L. *Aerodinamicheskii eksperiment v mashinostroenii*. L.: Mashinostroenie, 1974.
13. Taliev, V. N. *Aerodinamika ventilyatsii*. M.: Stroizdat, 1979.
14. Mitrofanova, O. V. *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalakh yaderno-energeticheskikh ustanovok*. M. Fizmatlit, 2010.
15. Zhou, Chao, Xiaodong Wu, Tongyi Zhang, Xu Zhao, Shaohua Gai, and Huizhu Xiang. “Dynamic analysis for two-phase vortex flow and optimization of vortex tools to unload liquid from gas wells.” *Journal of Petroleum Science and Engineering* 173 (2019): 965–974. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.10.091.
16. Nikitin, A. V. “Vikhr’ i vikhrevye dvizhiteli.” *Akademiya trinitarizma*. M., 2007. El. №77-6567.
17. Ostroukhov, Nikolai N., and Ekaterina V. Chumakova. “Vortex propulsion units of sea vessels and aircrafts.” *World of Transport* 14.6(67) (2016): 86–96.
18. Liu, Ming, Lei Tan, and Shuliang Cao. “Cavitation–vortex–turbulence interaction and one-dimensional model prediction of pressure for hydrofoil ALE15 by Large Eddy Simulation.” *Journal of Fluids Engineering* 141.2 (2019): 021103. DOI: 10.1115/1.4040502.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горобец Александр Григорьевич — кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: aleksandr-gorobets@yandex.ru,
kaf_physics@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorobets, Alexander G. — PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: aleksandr-gorobets@yandex.ru,
kaf_physics@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2019 г.

Received: February 21, 2019.