

4. Turnow J., Kornev N., Zhdanov V., Hassel E. Flow structures and heat transfer on dimples in a staggered arrangement // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2012. – Vol. 35. – P. 168 – 175.
5. Isaev S. A., Schelchkov A. V., Leontiev A. I., Gortyshov Yu. F., Baranov P. A., Popov I. A. Vortex heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – № 109. – P. 40 – 62.
6. Isaev S., Voropaev G., Grinchenko V., Sudakov A., Voskoboinick V., Rozumnyuk N. Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators // Abstract of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting “EDRFCM 2010” 2–4 September, 2010. – Kyiv, Ukraine, 2010. – P. 32 – 33.
7. Ворopaев Г. А., Розумнюк Н. В. Формирование квазистойчивых продольных вихревых структур в пристенных течениях на структурированных поверхностях // Комп'ютерна гідромеханіка : тези шостої міжнар. науково-практичної конф. 26 – 27 вересня 2018 р. – Київ : ІГМ НАНУ, 2018. – С. 18 – 19.

## References (transliterated)

1. Gad-el-Hak M. *Flow Control : Passive, Active, and Reactive Flow Management*. Cambridge, UK, Cambridge Univ. Press, 2000. 421 p.
2. Cattafesta L. N., Sheplak M. Actuators for active flow control. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2011, vol. 43, pp. 247–272.
3. Alfredsson P. H., Orlu R. Large-Eddy BreakUp devices – a 40 years perspective from a Stockholm Horizon. *Flow Turbulence Combust.* 2018, vol. 100, no. 4, pp. 877–888.
4. Turnow J., Kornev N., Zhdanov V., Hassel E. Flow structures and heat transfer on dimples in a staggered arrangement. *International Journal of Heat and Fluid Flow.* 2012, vol. 35, pp. 168–175.
5. Isaev S. A., Schelchkov A. V., Leontiev A. I., Gortyshov Yu. F., Baranov P. A., Popov I. A. Vortex heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2017, no. 109, pp. 40–62.
6. Isaev S., Voropaev G., Grinchenko V., Sudakov A., Voskoboinick V., Rozumnyuk N. Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators. *Abstract of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting “EDRFCM 2010” 2–4 September, 2010*. Kyiv, Ukraine, 2010. pp. 32–33.
7. Voropaev G. A., Rozumnyuk N. V. Formirovanie kvaziustoychivyykh prodol'nykh vikhrevyykh struktur v pristenochnykh techeniyakh na strukturirovannykh poverkhnostyakh [Development of quasi-stable longitudinal vortex structures in the near-wall flows over structured surfaces]. *Komp'yuterna gidromekhanika : tezy shostoyi mizhnar. naukovo-praktychnoyi konf. 26–27 veresnya 2018 r.* [Computer hydromechanics : Proceedings of the 6-th International Scientific and Practical Conference, Kyiv, September 26 – 27, 2018]. Kyiv, IGM NANU Publ., 2018. pp. 18–19.

Поступила (received) 16.03.2019

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Ворopaев Геннадій Олександрович (Voropaev Gennadii Aleksanrovich, Voropaiev Gennadii Oleksanrovic)**

– доктор фізико-математичних наук, професор, заступник директора, Інститут гідромеханіки Національної академії наук України, м. Київ; (044) 371-65-18; e-mail: voropaiev.gena@gmail.com.

**Розумнюк Наталія Вячеславівна (Rozumnyuk Nataliya Vyacheslavivna)**

– кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки Національної академії наук України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-39; e-mail: nrozumnyuk@yahoo.com.

УДК 532.5:534.7

**В. А. ВОСКОБОЙНИК, А. А. ВОСКОБОЙНИК, В. Н. ТУРИК, А. В. ВОСКОБОЙНИК****МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ПАРОЙ ОВАЛЬНЫХ ЛУНОК**

Приведены результаты физического моделирования генерации устойчивых противоположно вращающихся вихревых структур парой наклоненных к направлению потока овальных лунок. Проведены визуальные и инструментальные исследования, а также статистический анализ полей пульсаций давления вихревого течения, образованного парой овальных лунок на гидравлически гладкой плоской поверхности. Определены особенности генерации противоположно вращающихся вихревых структур лунками и их гидродинамические характеристики. Установлены места зарождения, формирования и развития вихревых структур в зависимости от режимов течения, а также области выброса вихрей в пограничный слой. Получены интегральные и спектральные характеристики пульсаций пристеночного давления на обтекаемой поверхности лунок и пластины. Определены частоты вращения вихревых структур и их выбросов наружу из наклоненных овальных лунок.

**Ключевые слова:** овальная лунка, вихревая структура, визуализация течения, пульсации скорости и давления, статистический анализ.

**В. А. ВОСКОБОЙНИК, О. А. ВОСКОБОЙНИК, В. М. ТУРИК, А. В. ВОСКОБОЙНИК****МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ВИХРОВИХ СТРУКТУР ПАРОЮ ОВАЛЬНИХ ЛУНОК**

Наведено результати фізичного моделювання генерації стійких протилежно обертових вихрових структур парою нахилених до напрямку течії овальних лунок. Проведено візуальні і інструментальні дослідження, а також статистичний аналіз полів пульсацій тиску вихрової течії, яка була утворена парою овальних лунок на гідралічно гладкій плоскій поверхні. Визначено особливості генерації протилежно обертових вихрових структур лунками та їх гідродинамічні характеристики. Установлено місця зародження, формування і розвитку вихрових структур в залежності від режимів течії, а також області викидів вихорів у прилеглий шар. Отримано інтегральні та спектральні характеристики пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні лунок і пластины. Визначені частоти обертання вихрових структур та їх викидів назовні з нахилених овальних лунок.

**Ключові слова:** овальна лунка, вихрова структура, візуалізація течії, пульсації швидкості та тиску, статистичний аналіз.

© В. А. Воскобойник, А. А. Воскобойник, В. Н. Турик, А. В. Воскобойник, 2019

V. A. VOSKOBOINICK, O. A. VOSKOBOINICK, V. N. TURICK, A. V. VOSKOBOINICK  
 MODELING OF VORTEX STRUCTURE GENERATION BY PAIR OF OVAL DIMPLES

The results of physical modeling of the generation of stable counter-rotating vortex structures by a pair of oval dimples, that are inclined to the flow direction, are given. Visual and instrumental studies, as well as statistical analysis of the velocity and pressure fluctuation fields of the vortex flow, were made. The vortex flow was created by a pair of the oval dimples on a hydraulically smooth flat surface. The features of generating the counter-rotating vortex structures by the dimples and their hydrodynamic characteristics were determined. The places of origin, formation, and development of vortex structures, as well as the area of the ejection of vortices into the boundary layer depending on the flow regimes were established. The integral and spectral characteristics of the velocity and wall pressure fluctuations on the streamlined surface of the dimples and plates were obtained. The rotation frequencies of the vortex structures and the ejection frequencies of the vortices outside the inclined oval dimples were determined.

**Key words:** oval dimple, vortex structure, flow visualization, velocity and pressure fluctuation, statistical analysis.

**Введение.** В последние годы в научной литературе и практической деятельности человечества большое внимание уделено *управлению течением* и, в частности, *пограничным слоем* с целью снижения сопротивления обтекаемых тел, гидродинамических шумов и вибраций обтекаемой поверхности, а также увеличения тепло- и массопереноса, ускорения процессов перемешивания различных жидкостей и компонентов, наполняющих их. Среди методов управления необходимо отметить активные (использующие дополнительную энергию) и пассивные, к которым необходимо отнести луночные поверхности [1 – 3]. Нанесение лунок различной конфигурации и размеров на гладкую обтекаемую поверхность приводит к формированию дополнительных вихревых структур и струйных течений, которые взаимодействуют с окружающим течением, изменяя его структуру и гидродинамические характеристики.

Минимум энергетических потерь, связанных с минимизацией сопротивления трения и формы, является одним из важных факторов, определяющих эффективность движения тел с заданной скоростью. При соответствующих условиях обтекания углублений внутри них образуются крупномасштабные когерентные вихревые структуры, которые генерируют интенсивные пульсации скорости, давления, температуры, завихренности и других параметров турбулентности, что используется в средствах управления пограничным слоем. В зависимости от режима течения, геометрических параметров и формы лунок внутри последних генерируются вихревые структуры различных масштабов, направлений движения, частот вращения и осцилляций, как в пространстве, так и во времени. Отрыв пограничного слоя с переднего края углубления и неустойчивость течения в сдвиговом слое, который образуется при этом, генерируют внутри углублений вихревые структуры. Эти вихревые структуры, взаимодействуя между собой и с обтекаемой поверхностью, при определенных условиях, выбрасываются наружу из углубления, изменяя структуру пограничного слоя и интегральные характеристики тел обтекания, процесс теплообмена и смешивания, качество аэродинамических профилей и т. д. [4 – 6].

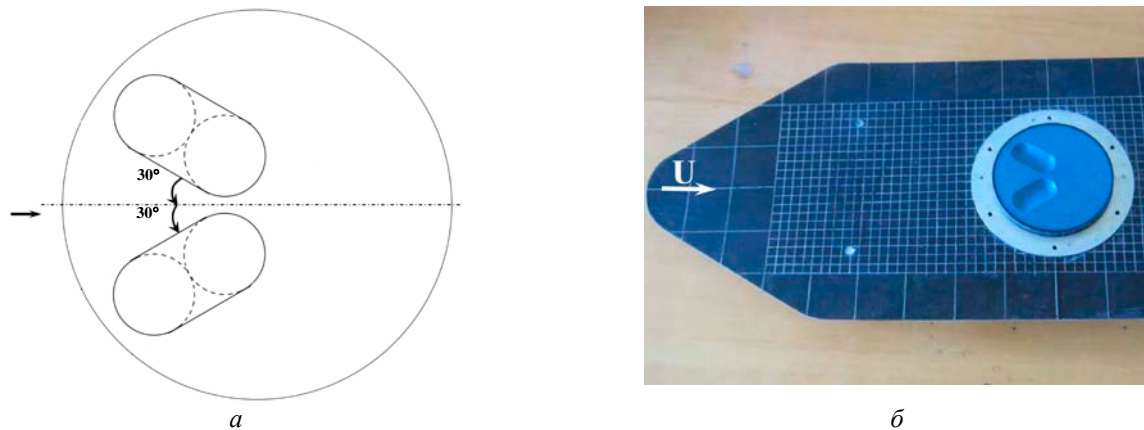


Рис. 1 – Геометрия и расположение пары овальных лунок на пластине: *a* – схема; *б* – фотография.

Генерация искусственных вихревых структур с заданно заданными параметрами является основной задачей управления пограничным слоем. Такие вихревые структуры, к которым относятся продольно противоположно вращающиеся вихревые пары, позволяют реализовать энергосберегающие технологии и улучшить экологию окружающей среды. Известно [7 – 9], что противоположно вращающиеся вихревые пары или струйки, зарождающиеся в пристеночной области пограничного слоя, подымаясь над обтекаемой поверхностью, стабилизируют вихреобразование в пограничном слое. Генерируя вихревые пары определенного масштаба и разделения, снижают сопротивление трения обтекаемой поверхности, устраняют либо сужают области отрыва пограничного слоя, уменьшают шум и вибрации тел обтекания [1, 10, 11].

Целью данной работы является моделирование генерации устойчивых вихревых структур в виде пары противоположно вращающихся вихрей системой овальных лунок на гидравлически гладкой поверхности и определение их особенностей формирования и развития, кинематических и динамических характеристик.

**Постановка задачи, программа и методика исследований.** Задачу генерации устойчивых вихревых структур заданной конфигурации и масштабов было предложено выполнить посредством физического моделирования. Для этого на гидравлически гладкой обтекаемой поверхности были сделаны две пары овальных лунок, которые располагались на некотором расстоянии друг от друга и находились под противоположными углами

относительно направления потока. Внутри лунок генерировались вихревые структуры, которые выбрасывались наружу из них в пограничный слой в виде продольных противоположно вращающихся вихрей.

Эксперименты проводились в гидродинамическом лотке с открытой поверхностью воды длиной 16 м, шириной 1 м и глубиной 0.4 м. Над дном лотка (на высоте 0.1 м) устанавливалась гидравлически гладкая пластина длиной 2 м и шириной 0.5 м. В центре пластины были сделаны две овальные лунки в виде двух сферических сегментов диаметром  $d = 0.025\text{ м}$ , которые соединялись цилиндрической вставкой (рис. 1). Длина каждой лунки была в два раза больше ширины, а ее глубина составляла  $0.22d$ . Две лунки находились под углом  $+30$  и  $-30$  градусов относительно направления течения, раздвинутые друг относительно друга в носовой части, а их кормовые части располагались на удалении  $0.2d$ .



Рис. 2 – Пьезокерамические датчики пульсаций давления: а – датчики и усилители; б – расположение.

Сначала проводилась визуализация течения с помощью контрастных водорастворимых покрытий и подачи цветных чернил и красок. Затем в характерных местах зарождения и эволюции вихревых структур проводились измерения кинематических и динамических характеристик пограничного слоя и вихревого течения. Для этого использовалась группа миниатюрных датчиков скорости и давления. Пленочные одно и двухкомпонентные *термоанемометры* фирмы *Диза* (Дания) с помощью хорошо обтекаемых державок и координатных приспособлений вводились в исследуемые объемы жидкости. *Пьезокерамические датчики пульсаций давления* (рис. 2) и *пьезорезистивные датчики давления*, установленные заподлицо с обтекаемой поверхностью и не возмущающие поток, измеряли поле пристеночного давления. Электрические сигналы датчиков через соответствующие усилители, фильтры и 16-канальный аналогово-цифровой преобразователь поступали на персональный компьютер, где они регистрировались, обрабатывались и анализировались по соответствующим алгоритмам и программам с привлечением аппарата теории вероятности и математической статистики [12, 13].

**Результаты исследований.** Результаты визуальных исследований показали, что для ламинарного режима течения ( $Re_d < 1000$ ) внутри овальных лунок не наблюдалось вихревого движения. С увеличением скорости потока обнаружено формирование неинтенсивных вихревых структур, которые скручивались и медленно колебались внутри лунок (рис. 3). В передней сферической части лунок формировалось циркуляционное течение, ко-

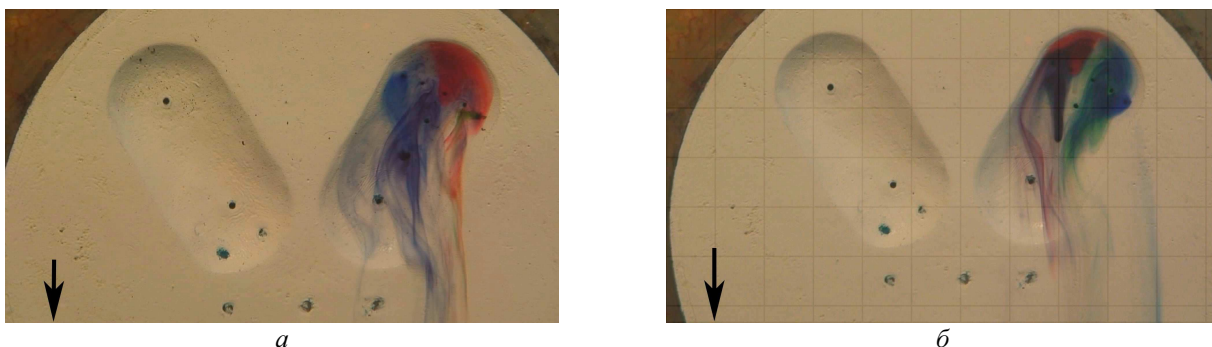


Рис. 3 – Формирование вихревого течения внутри лунки: а – для  $Re_d = 3500$ ; б – для  $Re_d = 5500$ .

торое перерождалось в вертикальный или наклонный вихрь, ось которого изгибалась по направлению течения [14]. Вихрь, перемещаясь вдоль лунок, принимал вид спиралевидной вихревой структуры, которая, увеличивая скорость закручивания и уменьшая свой поперечный масштаб, выбрасывалась наружу из лунки над ее кормовой частью (рис. 3, а). Спиралевидный вихрь сохранял свою конфигурацию при выходе из лунки и проходил в виде устойчивого продольного вихря достаточно большое расстояние (около 3 – 5 длин лунок). В результате системной овальных лунок генерировались пары противоположно вращающихся продольных вихрей. Для турбулент-

ного режима течения ( $Re_d > 5000$ ) внутри овальных лунок формировались спиралевидные вихри, которые с увеличением скорости прижимались к передним сферическим частям лунок (рис. 3, б). Эти вихри, достигая масштабов лунок, выбрасывались наружу из овальных лунок, нарушая структуру пограничного слоя. Выброшенный спиралевидный вихрь, прижимаясь к поверхности обтекаемой пластины, проходил расстояние около  $5d$ , а затем разрывался на части и выносился в пограничный слой пластины, где прекращал свое существование как когерентная продольная вихревая структура.

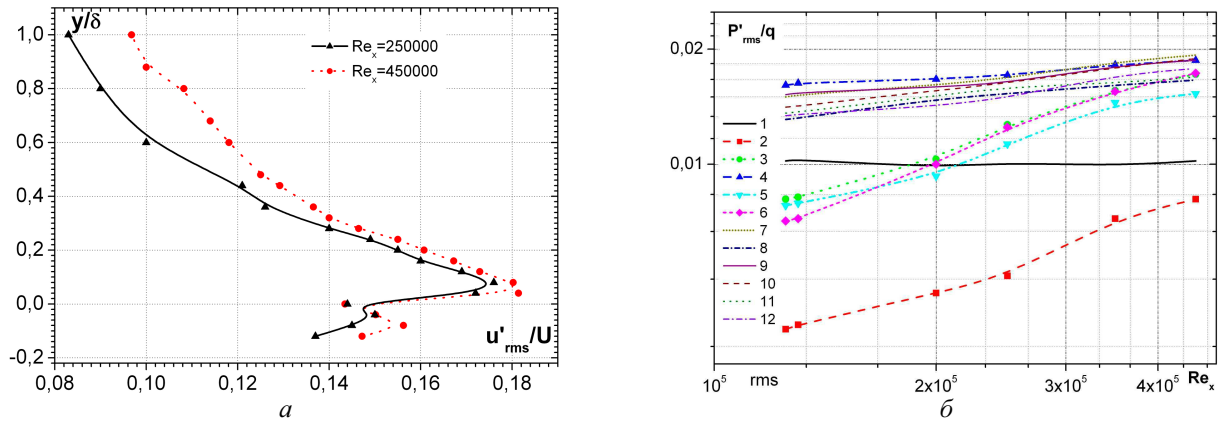


Рис. 4 – Среднеквадратичные значения пульсаций: а – скорости; б – давления.

Профиль пульсаций продольной скорости имел максимальные значения на уровне обтекаемой поверхности пластины, а также на границе сдвигового слоя, который формировался над отверстиями овальных лунок (рис. 4, а). Интенсивность поля пульсаций пристеночного давления была максимальной в области взаимодействия вихревых структур сдвигового слоя и выбрасываемых крупномасштабных вихревых структур с кормовой стенкой овальных лунок (рис. 4, б). На этом рисунке номера кривых соответствуют номерам датчиков пульсаций пристеночного давления, которые изображены на рис. 2, б. Наименьшая интенсивность пульсаций пристеночного давления имела место на дне овальной лунки в ее передней по потоку сферической части. С приближением к придонной части овальных лунок спектральные уровни пульсаций продольной скорости увеличивались, особенно в области низких частот. Максимальные уровни пульсаций скорости наблюдались на глубине  $(0.08 - 0.1)d$ .

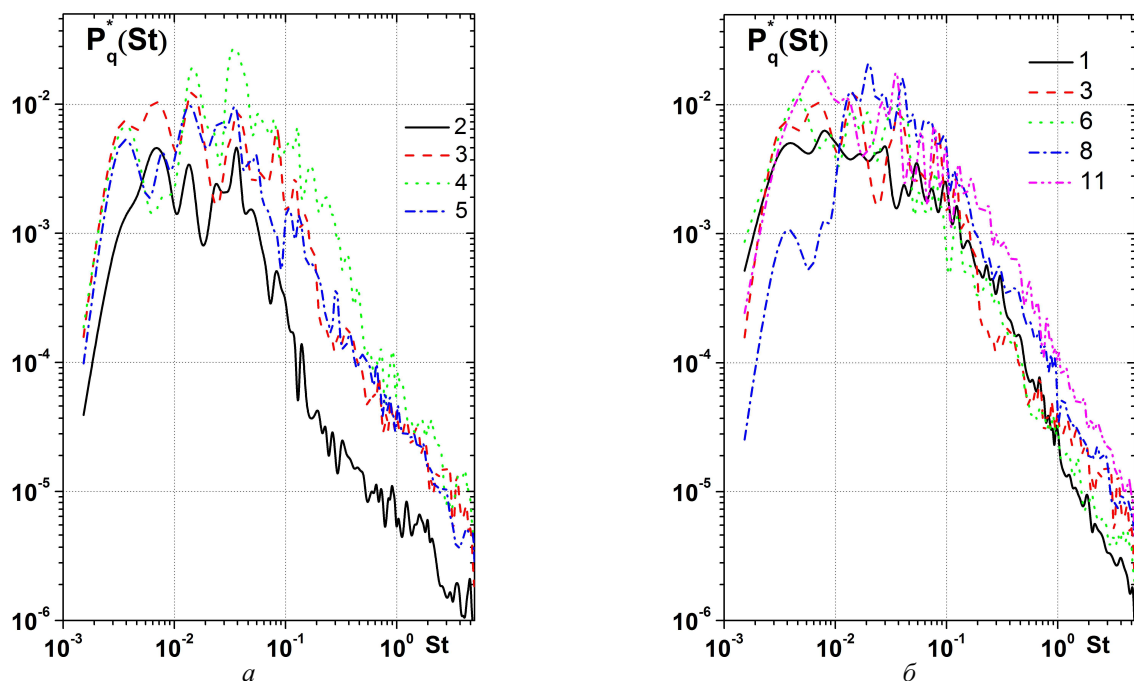


Рис. 5 – Спектральные плотности мощности пульсаций давления: а – внутри лунки; б – между ними.

Применяя алгоритм быстрого преобразования Фурье и весовую функцию Ханнинга, как рекомендуется в работе [13], был проведен спектральный анализ пульсаций пристеночного давления на обтекаемой поверхности лунок и измерительной пластины. В спектрах поля пульсаций пристеночного давления (рис. 5) и первых моментах спектральных плотностей мощности пульсаций пристеночного давления (рис. 6) появлялись характерные

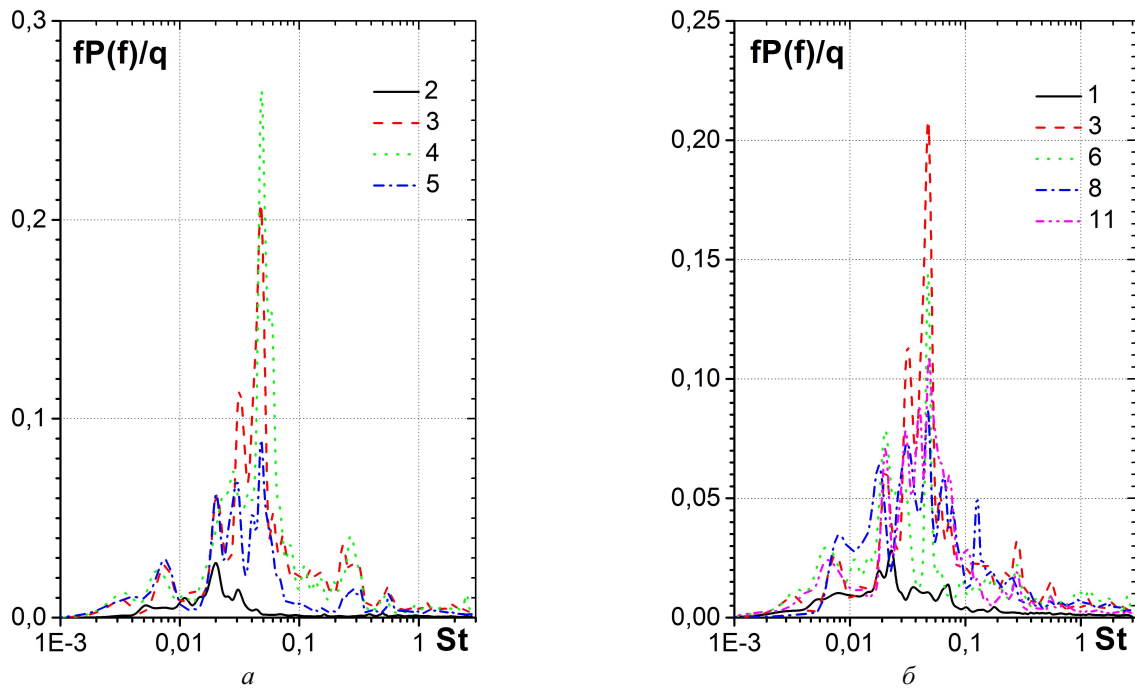


Рис. 6 – Первые моменты спектральных плотностей мощности пульсаций давления: *a* – внутри лунки; *б* – между ними.

особенности в виде дискретных пиков. Они соответствовали частотам, которые наблюдались в спектрах скорости [3, 14, 15]. В спектральных зависимостях наблюдались тональные подъемы на частотах выбросов крупномасштабных вихревых структур наружу из лунок, которым соответствовало число Струхала  $St = 0.05$ , на частотах вращения циркуляционного течения, которое формировалось внутри лунок ( $St = 0.13$ ) и на частотах автоколебаний вихревых структур сдвигового слоя ( $St = 0.48$ ). Так, при удалении до  $2d$  от лунок наблюдались тональные подъемы в спектрах пульсаций пристеночного давления, которые отвечали частотам выбросов крупномасштабных вихрей и частотам колебаний вихревого движения внутри лунок, как в срединном сечении системы лунок, так и позади их кормовых сферических частей. С удалением от системы овальных лунок более  $5d$  интенсивность тональных колебаний, характерных для вихревого движения внутри лунок, уменьшалась, а пограничный слой постепенно восстанавливался.

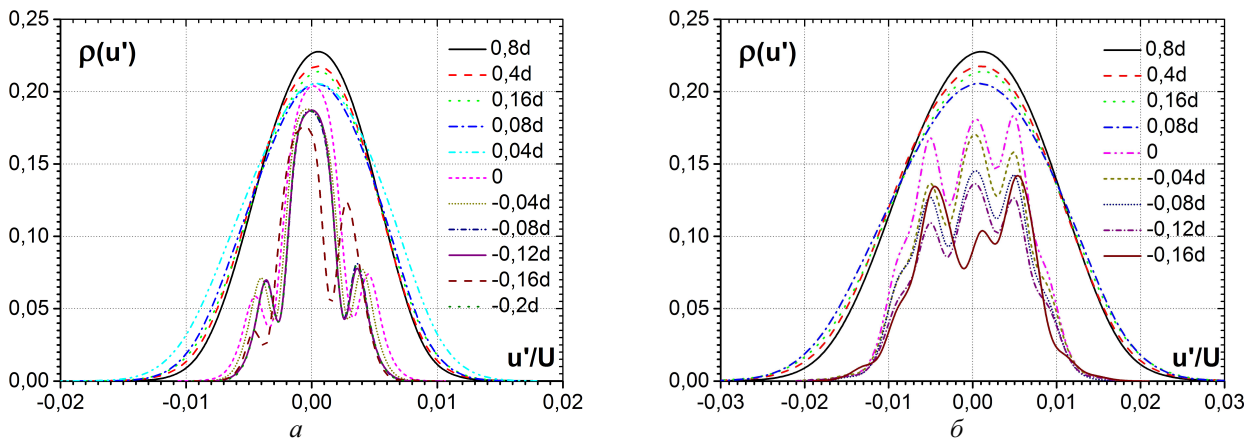


Рис. 7 – Функции плотности вероятности пульсаций скорости в срединном сечении лунки: *a* – для скорости потока 0.25 м/с; *б* – для скорости потока 0.45 м/с.

Плотности вероятностей появления пульсаций продольной скорости для турбулентного течения над овальными лунками и перед ними имели колоколообразный вид (рис. 7) с коэффициентами асимметрии и эксцесса близкими по значениям к гауссовскому случайному процессу. На этом рисунке кривые обозначены значениями расстояний от поверхности пластины относительно диаметра лунки. Внутри лунки наблюдалось взаимодействие случайного процесса с гармоничным процессом и функции плотности вероятностей приобрели двугорбый вид. При этом третий и четвертый статистические моменты поля пульсаций скорости существенно изменились и стали не нулевыми. Это обусловлено тем, что на мелкомасштабные вихревые структуры, которые генерируют пульсации скорости малой амплитуды, значительное влияние оказывали крупномасштабные вихри и интенсивное колебательное движение.

**Выводы.** Результаты экспериментальных исследований и статистической обработки данных показали, что для определенных условий течения, формы и расположения пары овальных лунок внутри последних формируются вихревые структуры, которые выбрасываются наружу из лунок в пограничный слой над плоской пластиной и формируют пары противоположно вращающихся вихревых структур.

Визуализация течения показала особенности формирования вихревого течения внутри лунок и взаимодействия его с пограничным слоем. Обнаружено, что для ламинарного режима течения внутри лунок не наблюдалось вихревого течения. С увеличением скорости обтекания или чисел Рейнольдса, рассчитанных по диаметру лунки, более 5000 (переходной и турбулентный режим течения) внутри лунок формируются вихревые структуры, которые, выбрасываясь из каждой овальной лунки, формируют противоположно вращающиеся вихри. Эти вихри, перемещаясь вниз по потоку от лунок, взаимодействуют с вихревыми структурами пограничного слоя пластины. На удалении более 5 диаметров лунок эти продольные вихри разрушались и теряли свою когерентность.

Измерения поля скорости и давления над и на обтекаемых поверхностях позволили зарегистрировать кинематические и динамические характеристики вихревого течения и пограничного слоя. Установлены места зарождения вихревых структур для различных режимов течения, их частоты вращения и колебаний, а также выбросов наружу из лунок. Показаны области взаимодействия пар противоположно вращающихся вихревых структур с пограничным слоем и их протяженность. В профилях пульсаций скорости над и внутри овальной лунки наблюдались максимальные значения на уровне обтекаемой поверхности, а также на границе сдвигового слоя.

#### Список литературы

1. Gad-el-Hak M. Flow control. Passive, active, and reactive flow management. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2000. – 421 p.
2. Kornilov V. I. Reduction of turbulent friction by active and passive methods (review) // Thermophysics and Aeromechanics. – 2005. – Vol. 12. – № 2. – P. 175 – 196.
3. Voskoboinick V. A., Voskoboynik O. A., Voskobijnyk A. V. Flow control by vortex cavity generator // Proc. VIII-th World Congress “Aviation in the XXI-st Century”. – Kyiv : NAU, 2018. – P. 1.1.14 – 1.1.18.
4. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Олимпиев В. В., Шелчков А. В., Каськов С. И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. – Казань : Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
5. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – Киев : ИТТФ НАНУ, 2005. – 76 с.
6. Voropayev G. A., Voskoboinick V. A., Rozumnyuk N. V., Voskoboinick A. V. Vortical flow features in a hemispherical cavity on a flat plate. // Proc. VI-th Intern. Sympos. Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP – 6. June 22 – 24, 2009. – Seoul, 2009. – P. 563 – 568.
7. Rowley C. W., Dawson S. T. M. Model reduction for flow analysis and control // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2017. – Vol. 49. – P. 387 – 417.
8. Ortega J. M., Bristol R. L., Savas O. Experimental study of the instability of unequal-strength counter-rotating vortex pairs // J. Fluid Mech. – 2003. – Vol. 474. – P. 35 – 84.
9. Leweke T., Le Dizès S., Williamson C. H. K. Dynamics and instabilities of vortex pairs // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2016. – Vol. 48. – P. 507 – 541.
10. Blackwelder R. F. Some notes on drag reduction in the near-wall region // Lecture Notes in Physics. – Springer, 1998. – Vol. 54. – P. 155 – 198.
11. Isaev S., Voropaev G., Grinchenko V., Sudakov A., Voskoboinick V., Rozumnyuk N. Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators // Abstract of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting “EDRFCM 2010”. – Kyiv, Ukraine, 2010. – P. 32 – 33.
12. Voskoboinick V., Kornev N., Turnov J. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements // Flow Turbulence Combust. – 2013. – Vol. 90. – № 4. – P. 709 – 722.
13. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
14. Voskoboinick V., Voskoboinick A., Stepanovitch V. Generation of vortex structures by pair oval dimples on flat plate. Proc. European Drag Reduction and Flow Control Meeting – EDRFCM 2015, March 23 – 26, 2015. – Cambridge, UK, 2015. – P. 43 – 44.
15. Voskoboinick V. A., Turick V. N., Voskoboynik O. A., Voskoboinick A. V., Tereshchenko I. A. Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer // In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. – Vol 754. – P. 23 – 32.

#### References (transliterated)

1. Gad-el-Hak M. Flow control. Passive, active, and reactive flow management. Cambridge, Cambridge Univ. Press Publ., 2000. 421 p.
2. Kornilov V. I. Reduction of turbulent friction by active and passive methods (review). Thermophysics and Aeromechanics. 2005, vol. 12, no. 2, pp. 175–196.
3. Voskoboinick V. A., Voskoboynik O. A., Voskobijnyk A. V. Flow control by vortex cavity generator. Proc. VIII-th World Congress “Aviation in the XXI-st Century”. Kyiv, NAU Publ., 2018, pp. 1.1.14–1.1.18.
4. Gortyschov Yu. F., Popov I. A., Olimpiev V. V., Shchelchikov A. V., Kas'kov S. I. Teplogidravlicheskaya effektivnost' perspektivnykh sposobov intensifikatsii teplotdachi v kanalakh teploobmennogo oborudovaniya [Thermohydraulic efficiency of prospective methods for intensifying heat transfer in the heat exchange equipment channels]. Kazan', Centr innovation tekhnologiy Publ., 2009. 531 p.
5. Khalatov A. A. Teploobmen i gidrodinamika okolo poverkhnostnykh uglubleniy (lunok) [Heat exchange and hydrodynamics of near-surface cavities (dimples)]. Kyiv, ITTF NASU Publ., 2005. 76 p.
6. Voropayev G. A., Voskoboinick V. A., Rozumnyuk N. V., Voskoboinick A. V. Vortical flow features in a hemispherical cavity on a flat plate. Proc. VI-th Intern. Sympos. Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP – 6. June 22 – 24, 2009. Seoul, 2009. pp. 563–568.
7. Rowley C. W., Dawson S. T. M. Model reduction for flow analysis and control. Annu. Rev. Fluid Mech. 2017, vol. 49, pp. 387–417.
8. Ortega J. M., Bristol R. L., Savas O. Experimental study of the instability of unequal-strength counter-rotating vortex pairs. J. Fluid Mech. 2003, vol. 474, pp. 35–84.
9. Leweke T., Le Dizès S., Williamson C. H. K. Dynamics and instabilities of vortex pairs. Annu. Rev. Fluid Mech. 2016, vol. 48, pp. 507–541.

10. Blackwelder R. F. Some notes on drag reduction in the near-wall region. *Lecture Notes in Physics*. Springer, 1998, vol. 54, pp. 155–198.
11. Isaev S., Voropaev G., Grinchenko V., Sudakov A., Voskoboinick V., Rozumnyuk N. Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators. *Abstract of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting “EDRFCM 2010”*. Kyiv, Ukraine, 2010. pp. 32–33.
12. Voskoboinick V., Kornev N., Turnov J. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. *Flow Turbulence Combust.* 2013, vol. 90, no. 4, pp. 709–722.
13. Bendat J., Pirsol A. *Prikladnoy analiz sluchaynykh dannykh* [Applied analysis of random data]. Moscow, Mir Publ., 1989. 540 p.
14. Voskoboinick V., Voskoboinick A., Stepanovitch V. Generation of vortex structures by pair oval dimples on flat plate. *Proc. European Drag Reduction and Flow Control Meeting – EDRFCM 2015, March 23–26, 2015*. Cambridge, UK, 2015, pp. 43–44.
15. Voskoboinick V. A., Turick V. N., Voskoboinyck O. A., Voskoboinick A. V., Tereshchenko I. A. Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer. In: *Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham., 2019, vol 754, pp. 23–32.

Поступила (received) 26.03.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Воскобійник Володимир Анатолійович (Воскобойник Владимир Анатольевич, Voskoboinick Vladimir Anatolievich)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: vlad.vsk@gmail.com.

**Воскобойник Олександр Анатолійович (Воскобойник Александр Анатольевич, Voskoboinick Oleksandr Anatoliyovych)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: alexandr.vsk@gmail.com.

**Турик Володимир Миколайович (Турик Владимир Николаевич, Turick Vladimir Nikolaevich)** – кандидат технічних наук, доцент, професор НТУУ Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, професор кафедри, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: turick46@gmail.com.

**Воскобійник Андрій Володимирович (Воскобойник Андрей Владимирович, Voskoboinick Andrew Vladimirovich)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: andrew.vsk@gmail.com.

УДК 532.5

**А. А. ГУРЖИЙ, О. И. КОРДАС, Е. И. НИКИФОРОВИЧ, Д. И. ЧЕРНИЙ**

#### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассматривается задача о двумерной адвекции поверхностного загрязнения морскими течениями со сложной геометрией береговой линии в приближении идеальной несжимаемой жидкости. Задача решена с использованием численного метода дискретных особенностей, адаптированного к задачам адвекции жидкости. Обсуждается иллюстрационный пример эволюции загрязнения в Днепровско – Бугском лимане. Показано, что действие ветра приводит к значительным изменениям в движении загрязнения, к заметному замедлению скорости движения загрязнения и его смещению в поперечном направлении по отношению к основному потоку.

**Ключевые слова:** задача адвекции, 2D потенциальное течение, метод дискретных особенностей, поверхностное загрязнение.

#### О. А. ГУРЖИЙ, О. І. КОРДАС, Є. І. НІКІФОРОВИЧ, Д. І. ЧЕРНИЙ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ДИСКРЕТНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРИ СКЛАДАННІ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУ ПОШИРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ НА МОРСЬКІЙ ПОВЕРХНІ

Розглядається задача про двовірну адвекцію поверхневого забруднення морськими течіями зі складною геометрією берегової лінії в наближенні ідеальної нестисливої рідини. Задача розв'язана з використанням чисельного методу дискретних особливостей, адаптованого до задач адвекції рідини. Обговорюється ілюстративний приклад еволюції забруднення в Дніпровсько – Бугському лимані. Показано, що дія вітру призводить до значних змін в русі забруднення, до помітного уповільнення швидкості руху забруднення і його зміщення в поперечному напрямку по відношенню до основного потоку.

**Ключові слова:** задача адвекції, 2D потенційна течія, метод дискретних особливостей, поверхневе забруднення.

#### А. А. GOURJI, O. I. KORDAS, E. I. NIKIFOROVICH, D. I. CHERNIY APPLICATION OF THE METHOD OF DISCRETE SINGULARITIES IN SHORT-TERM FORECASTING OF POLLUTION PROPAGATION ON THE SEA SURFACE

The paper deals with the two-dimensional advection problem of surface pollution by sea currents with complex coastline geometry in the approximation of an ideal incompressible fluid. The problem was solved using the numerical method of discrete singularities adapted to the advection problems of fluids. An illustrative example of the evolution of pollution in the Dnieper – Bug estuary is discussed in the report. It is shown that the effect of the wind leads to significant changes in the movement of pollution, to a noticeable slowing of the pollution movement, and its displacement in the transverse direction with respect to the main flow.

**Key words:** advection problem, 2D potential flow, method of discrete singularities, surface pollution.

© А. А. Гуржий, О. И. Кордас, Е. И. Никифорович, Д. И. Черний, 2019

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, № 8 (1333) 2019.*