

УДК 532.5.013.2; 532.5.013.12

ИМПУЛЬСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУЙ С ПРОНИЦАЕМОЙ ГРАНИЦЕЙ*

PULSED INTERACTION OF JETS WITH THE PERMEABLE BOUNDARY

П.Р. АНДРОНОВ, С.В. ГУВЕРНЮК, П.П. ПАСТУШКОВ
P.R. ANDRONOV, S.V. GUVERNYUK, P.P. PASTUSHKOV

(Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук,
Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова)
(Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Institute of Mechanics of the Moscow State University named after M.V. Lomonosov)
E-mail: andronov.peter@yandex.ru; guv@mail.ru; pavel-one@mail.ru

На основе бессеточного численного метода вязких вихревых доменов исследуются нестационарные вихревые взаимодействия осесимметричных затопленных воздушных струй с тонкими проницаемыми экранами. Идентифицированы кольцевые вихревые сгустки, формирующиеся в передней части струи при ее проникании сквозь проницаемые экраны различной степени проницаемости, исследуются соответствующие нестационарные нагрузки на проницаемую границу.

On the basis of a numerical method for viscous gridless vortex domains investigated nonstationary vortex interaction submerged axisymmetric air jets with thin permeable screens. Ring vortex identified clots forming in front of the jet during its penetration through the permeable screens with varying degrees of permeability. We study the corresponding non-stationary distribution of pressure drop across the porous borders.

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП Министерства образования и науки РФ (соглашение 14.576.21.0079, проект RFMEFI57614X0079).

Ключевые слова: импульсные осесимметричные воздушные струи, просачивание вихрей сквозь проницаемый экран, перепад давления, сила сопротивления.

Keywords: pulsed axisymmetric air jet, the leakage of vortices through the permeable screen, differential pressure, resistance force.

Проницаемые экраны или фильтры широко используются в различных технических приложениях, например, при выравнивании вихревых турбулентных потоков в аэродинамических трубах и каналах вентиляционных трактов [1]. В строительстве применяются воздухопроницаемые стеклоткани и мембраны в составе навесных фасадных систем [9], [10]. Облицовочный слой таких систем также представляет собой проницаемый экран со щелевым типом проницаемости. При взаимодействии проницаемых экранов со струйно-вихревыми течениями происходит изменение формы и интенсивности вихревых структур, проникающих сквозь проницаемые границы [2], [7], [11]. При этом для аэродинамических труб и вентиляционных каналов практическим результатом является однородность и устойчивость потока с подветренной стороны от проницаемых поверхностей, а также отсутствие крупных нестационарных вихрей. Известны идеи по использованию крупногабаритных проницаемых экранов для защиты промышленных и сельскохозяйственных объектов и жилых зданий от сильных ветровых порывов за счет сглаживания локальных неравномерностей потока, особенно при существенно переменной скорости ветра и при наличии мощных локальных вихрей, возникающих в результате обтекания рельефа земной поверхности или искусственных наземных сооружений [8...10].

Во всех вышеописанных случаях требуется определять наилучшие характеристики проницаемых поверхностей, прежде всего, степень их проницаемости, которые обеспечат, с одной стороны, достаточное выравнивание потока, а – с другой стороны, не будут чрезмерно ослаблять (в случае ветроэнергетических объектов) полезную мощность ветра. Для выравнивания потока и для стабилизации силы сопротивления

нужен такой тип взаимодействия экрана с потоком, при котором все крупные вихри, не оказывая чрезмерного влияния на преграду, должны при проникании превращаться в относительно однородный поток с подветренной стороны проницаемой границы.

В настоящей работе представлены результаты исследования закономерностей редукации крупномасштабных вихревых структур при взаимодействии нестационарных воздушных струй тонких проницаемых перегородок или экранов в открытом пространстве, а также зависимости нестационарных нагрузок от степени проницаемости препятствия, на примере задачи о взаимодействии круглой затопленной воздушной струи с соосным дисковым экраном.

Граничные условия на проницаемой преграде

Пористое или проницаемое тело представляет собой оболочку, состоящую из большого числа мелкомасштабных фрагментов, между которыми имеются просветы. Составленная из этих фрагментов граница не подчиняется условию непротекания. Несмотря на выполнение условия прилипания на поверхности каждого из твердых фрагментов, жидкость может проникать сквозь такую проницаемую границу. Так же, как в [2], проницаемая граница вместе с прилегающими слоями локального мелкомасштабного течения, зависящего от деталей структуры пористости, заменяется поверхностью разрыва основного течения, при этом предполагается наличие некоторой скорости просачивания в каждой точке проницаемой поверхности.

Состояния воздушной среды до просачивания и после просачивания должны быть связаны соотношениями на поверхности разрыва. Однако здесь существует известная проблема построения полной системы граничных условий, поскольку недос-

точно общих соотношений, вытекающих из интегральных законов сохранения на поверхности разрыва, и требуется привлекать дополнительные граничные соотношения, которые зависят от типа пористости проникаемого материала и от свойств пристеночного течения [2]. Граничные условия в каждой точке до и после просачивания представляют собой алгебраические связи

$$nV_1 = nV_2 = V_n > 0, \quad \rho V_n(V_1 - V_2) = (p_2 - p_1)n - P_n, \quad (1)$$

выражающие законы сохранения массы и изменения импульса. Уравнения (1) должны дополняться частными соотношениями, указывающими конкретную форму для зависимости напряжения P_n (действующего со стороны жидкости на единичную площадку поверхности с нормалью n , которая направлена от подветренной стороны поверхности к ее наветренной стороне) от параметров проникающей среды и от локальных физических свойств проникаемой границы. Здесь V – вектор скорости среды, ρ – плотность, p – давление, n – единичный вектор нормали к проникаемой границе.

В качестве таких соотношений используются линейный закон просачивания типа Дарси (пропорциональная зависимость нормальной скорости просачивания от перепада давления: $V_n = k(p_1 - p_2)$) или квадратичный закон просачивания (когда квадрат от нормальной скорости пропорционален перепаду давлений между наветренной и подветренной сторонами проникаемой границы: $aV_n^2 = (p_1 - p_2)$) и связь между касательными составляющими скорости $V_{\tau 1}$, $V_{\tau 2}$ на поверхности разрыва, которая характеризует степень потери касательного импульса при проникании несжимаемой среды через рассматриваемую проникаемую поверхность [2]:

$$\begin{aligned} V_n &= k(p_1 - p_2), & V_{\tau 2} &= TV_{\tau 1}, \\ aV_n^2 &= (p_1 - p_2), & V_{\tau 2} &= TV_{\tau 1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь V_n и V_{τ} – нормальная и касательная составляющие вектора скорости V на

между параметрами основного потока по обе стороны поверхности разрыва (индекс 1 соответствует наветренной стороне поверхности, индекс 2 – ее подветренной стороне). Из законов сохранения массы и изменения импульса на разрыве, испытывающем ненулевую нагрузку P_n , получаются общие граничные условия [2]:

разрыве; индексы 1 и 2 указывают на локально наветренную и на локально подветренную стороны проникаемой границы.

Перепад полного давления на проникаемом экране [2]:

$$\Delta p_0 = 0,5\rho V_n^2 \left(\zeta + (1 - T^2) \frac{V_{\tau 1}^2}{V_n^2} \right) \quad (3)$$

выражается через параметры проницаемости: ζ – коэффициент гидравлических потерь, T – коэффициент потерь касательного импульса. В случае проницаемости первого рода [11] проникаемая граница не обладает направляющим действием ($T=1$), нет потерь касательного импульса, и перепад полного давления равен перепаду статического давления.

Постановка задачи. Решается задача о численном моделировании проникания через проникаемый экран кольцевого вихря, формируемого импульсной воздушной струей в первоначально покоящейся вязкой несжимаемой воздушной среде (рис. 1 – схема развития осесимметричной струи, истекающей из круглого сопла).

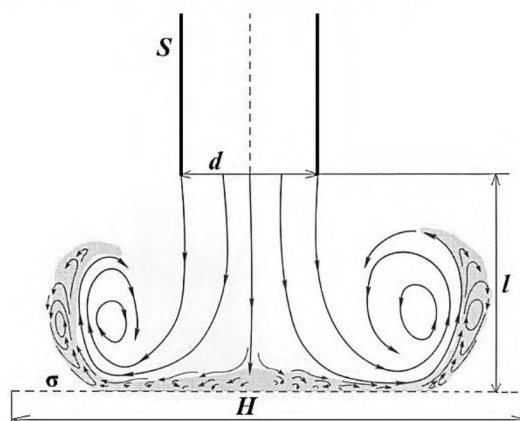


Рис. 1

Задача имеет экспериментальный аналог [3] и решается при том же самом числе Рейнольдса $Re = \frac{UL}{\nu} = 700$, $Re = 700$, что

было в экспериментах [3]. $L=R = \frac{d}{2}$ – радиус круглого сопла. Вытекающая из него круглая струя имеет диаметр d , ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха.

Проницаемый экран представляет собой плоский бесконечно тонкий круглый проницаемый диск с диаметром $H=10L$, $L=10$, $R=5d$. Расстояние от среза сопла до проницаемого экрана 5,8 см (как в экспериментах [3]). В отличие от [11], где предполагалось, что проницаемая граница обладает полным направляющим действием ($T=0$), здесь предполагается отсутствие направляющего действия ($T=1$), что характерно для проницаемых поверхностей, подобных сеткам в экспериментах [3].

На поверхности сопла S (как на внутренней, так и на внешней сторонах, рис. 1) задается граничное условие прилипания: $\vec{V}|_S = 0$. При $Re = 700$ кусочно-линейный закон изменения суммарного расхода воздуха в истекающей струе задается в виде:

$$U(t)[\text{м/с}] = \begin{cases} 1,0796t, & 0 < t < 0,296, \\ 0,32, & 0,296 < t < 0,889, \\ -1,0796t + 1,28, & 0,889 < t < 1,186. \end{cases} \quad (4)$$

Сила сопротивления, действующая на экран, вычисляется путем интегрирования перепада давления:

$$F_x = \iint_{S_{\text{screen}}} \pi \rho \zeta(\sigma) r V_n^2(r) d\phi dr. \quad (5)$$

Численное моделирование выполнено с помощью бессеточного численного метода вязких вихревых доменов [4...6] в предположении о сохранении осевой симметрии течения.

Результаты расчетов.

Все представленные далее результаты численного моделирования приводятся для случая $Re=700$ и степени проницаемости экрана σ (отношение суммарной площади всех просветов к общей площади проницаемой поверхности) соответствуют экспериментальной работе [3].

Наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и расчетных результатов по размерам и по форме кольцевых вихрей в соответствующие моменты времени.

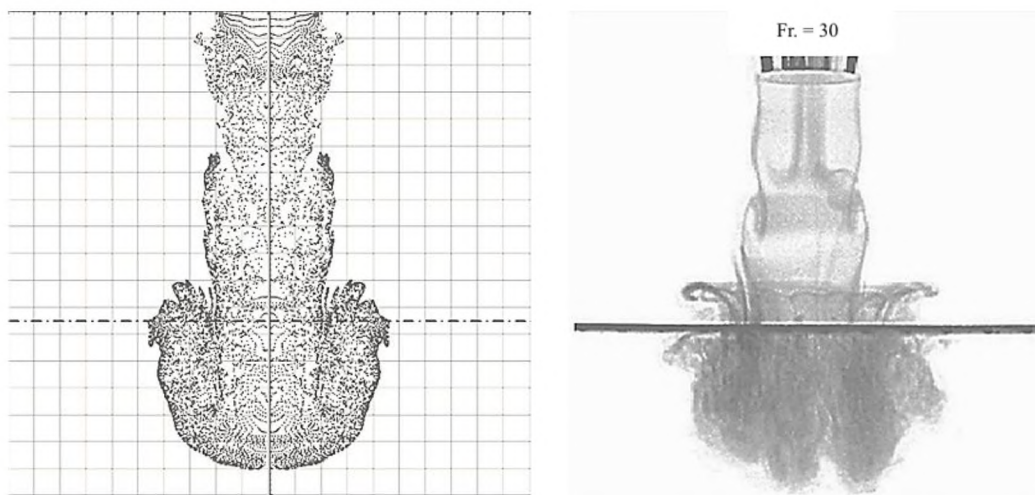


Рис. 2

На рис. 2 (визуализация с помощью безынерционной примеси движения кольцевого вихря, формирующегося при истечении импульсной круглой струи, и его просачивания сквозь проницаемый экран

при $\sigma=0,8$, $Re = 700$ для момента безразмерного времени $t=0,99$; слева – расчет; справа – эксперимент) приводится сравнение результатов визуализации картины течения при расчете с помощью бессеточного

ме-тода вязких вихревых доменов и в эксперименте [3] с помощью искусственного внесения в поле течения безынерционных частиц, которые затем движутся вместе с потоком. Видно, что имеется хорошее согласование по структуре и по масштабам свободного вихревого течения. Сравнение мгновенных картин линий тока (безразмерное время $t = 13$) при различных значениях проницаемости экрана σ представлено на рис. 3 (сравнение мгновенных картин линий тока при проникании струи через проницаемый экран с различной степенью проницаемости: $\sigma = 0,3$ (а), $0,4$ (б), $0,5$ (в), $0,6$ (г), $0,7$ (д), $0,8$ (е)).

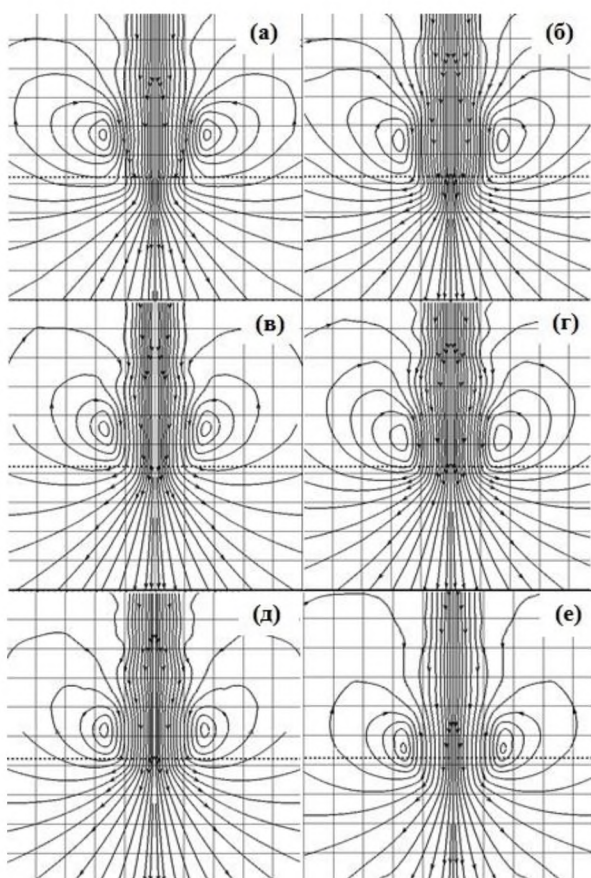


Рис. 3

На рис. 4 (зависимость от безразмерного времени коэффициента силы взаимодействия импульсной струи с проницаемыми экранами при различных значениях проницаемости: 1 – $\sigma = 0,6$; 2 – $\sigma = 0,7$; 3 – $\sigma = 0,8$) показаны расчетные зависимости от безразмерного времени обезразмеренных мгновенных значений силы взаимодействия (5) между набегающей импульсной струей,

скорость в которой меняется в соответствии с формулой (4), и проницаемым экраном (силы сопротивления экрана, который в данной постановке задачи имеет форму бесконечно тонкого и плоского проницаемого круглого диска с радиусом, равным 10 безразмерным единицам, то есть радиус экрана на порядок превышает радиус сопла). Поскольку расход среды в круглой струе монотонно возрастает от нуля до его максимального значения по линейному закону, сила сопротивления круглого проницаемого экрана в этой струе также монотонно и почти линейно возрастает, и тем больше, чем меньше значение степени проницаемости. Эта закономерность слегка нарушается на начальном этапе развития струи только при переходе от значения $\sigma = 0,7$ к $\sigma = 0,8$. В этом случае до момента времени $t = 12$ сила сопротивления незначительно возрастает при $\sigma = 0,8$ по сравнению со случаем $\sigma = 0,7$. Этот эффект можно объяснить, сравнивая рис. 3 (д) и рис. 3 (е), из которых видно, что именно при снижении проницаемости от $\sigma = 0,8$ до $\sigma = 0,7$ происходит достаточно резкое замедление распространения кольцевого вихря. В результате в один и тот же момент безразмерного времени, мгновенный расход среды, натекающий на экран с подветренной стороны, в случае $\sigma = 0,7$ станет заметно меньше (так как основное ядро вихря в этот момент еще не успело дойти до экрана, как это произошло в случае $\sigma = 0,8$), что и обуславливает некоторое падение силы сопротивления.

На рис. 5 (зависимость от безразмерного времени коэффициента силы взаимодействия струи с постоянным расходом; 1 – $\sigma = 0,6$; 2 – $\sigma = 0,7$; 3 – $\sigma = 0,8$) изображены зависимости от безразмерного времени мгновенных значений силы взаимодействия между набегающей струей с постоянным расходом при $Re=700$ и проницаемым экраном. Можно видеть, что в результате взаимодействия вихревых структур, формирующихся при истечении струи с постоянным расходом, с проницаемыми экранами, имеющими $\sigma > 0,5$, после достижения головным вихрем поверхности экрана при $t \sim 12,0$ наблюдаются квазипериодические колебания силы сопротивления.

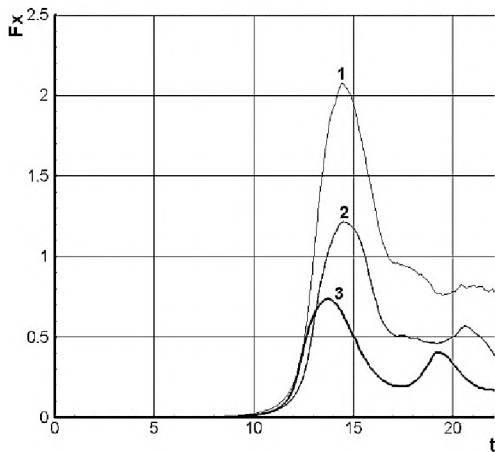


Рис. 4

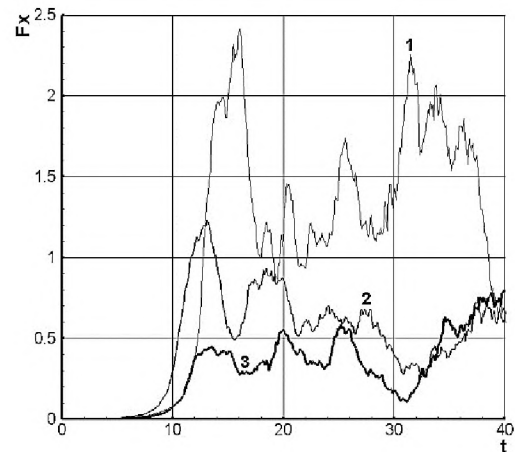


Рис. 5

Из рис. 4 и рис. 5 вытекает, что между коэффициентом для степени проницаемости максимальным по абсолютной величине значением безразмерной силы сопротивления экрана существует достаточно сильная корреляция. В частности, для импульсной осесимметричной струи (рис. 4) можно заметить, что при уменьшении значения коэффициента проницаемости экрана σ от 0,8 до 0,6, то есть, в 1,3 раза, максимальное значение силы сопротивления экрана увеличивается в 2,8 раза. В то же время для осесимметричной струи с постоянным расходом (рис. 5) при аналогичном изменении коэффициента σ максимальная сила сопротивления возрастает примерно в 3 раза.

ВЫВОДЫ

1. Проведено численное исследование нестационарного взаимодействия импульсной круглой воздушной струи и сформированного ею вихревого кольца с тонким проницаемым экраном в форме сетки, имеющим различную степень проницаемости. Использован численный метод вязких вихревых доменов для решения осесимметричных двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса в лагранжевых координатах. Воспроизведено явление распространения, просачивания и рассеивания затопленной импульсной струи и сформированного ею кольцевого вихря при взаимодействии струйного потока вязкой и несжимаемой среды с проницаемыми экра-

нами с различными степенями проницаемости. Получено согласование расчетов и экспериментов по структуре кольцевых вихрей, а также по скорости их проникания через экраны (в зависимости от степени проницаемости экранов).

2. Показано, что для увеличения силы взаимодействия проницаемой поверхности с мощным вихрем примерно в 3 раза достаточно уменьшить степень проницаемости материала (коэффициент проницаемости) не в 3, а всего лишь в 1,3 раза. Таким образом, в случаях малой или умеренной проницаемости без направляющего действия возможно использование исследованных проницаемых сеток и экранов для ослабления мощных вихрей с целью защиты промышленных и сельскохозяйственных объектов, например, ветроэнергетических установок, или жилых зданий от сильных порывов ветра. Регулирование величины проницаемости позволяет заметно уменьшить влияние вихревых возмущений на силу сопротивления проницаемого экрана или парашюта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дербунович Г.И., Земская А.С., Ретик Е.У., Соседко Ю.П. Оптимальные условия гашения турбулентности потока в рабочей части аэродинамической трубы с помощью сеток, установленных в форкамере // Ученые записки ЦАГИ. – 1989. Том XX. №3. С. 37...43.
2. Рахматулин Х.А., Гувэрнюк С.В., О постановке задач обтекания проницаемых тел несжимаемой средой // В сб.: Парашюты и проницаемые тела. – М.: Изд-во Моск. ун-та., 1987. С. 5...24.

3. Xudong A., Howard F., Srinath I. Experimental investigation of air vortex interaction with porous screen // Proceedings of the ASME 4-th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM, August 3-7, 2014, Chicago, Illinois, USA).

4. Дынкикова Г.Я. Лагранжев подход к решению нестационарных уравнений Навье-Стокса // Докл. РАН. – 2004. Т. 399, №1. С. 42...46.

5. Андронов П.Р., Гувернюк С.В., Дынкикова Г.Я. Вихревые методы расчета нестационарных гидродинамических нагрузок. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006.

6. Андронов П.Р., Гирча А.И., Гувернюк С.В. О стабилизации уловленного вихря в каверне с помощью проницаемой крышки // Современные проблемы математики и механики. – Том II. Механика. Вып. 1 / Под ред. акад. Г.Г. Черного и проф. В.П. Карликова. – М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 33...41.

7. Castro I.P. Some problems concerning the production of a linear shear flow using curved wire-gauze screens // J. Fluid Mech. – Vol. 76, Part 4, 1976.

8. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Кубенин А.С. и др. К методике расчета влияния ветровых воздействий на воздушный режим зданий // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 4. С. 234...240.

9. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Лушин К.И., Пастушков П.П. О применении ветрогидрозащитных мембран в навесных фасадных системах с вентилируемой воздушной прослойкой. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012, № 5. С. 128...131.

10. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Лушин К.И., Пастушков П.П. К вопросу о применении ветрогидрозащитных мембран в навесных фасадных системах с вентилируемой воздушной прослойкой. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013, № 3. С. 120...122.

11. Andronov P.R., Guvernyuk S.V. The streamline flow around a permeable plate in a plane-parallel channel. // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – Vol.79, №3, 2015. P. 270...280.

REFERENCES

1. Derbunovich G.I., Zemskaja A.S., Repik E.U., Sosedko Ju.P. Optimal'nye uslovija gasheniya turbulentnosti potoka v rabochej chasti ajerodinamicheskoj trubicy s pomoshh'ju setok, ustanovlennyh v forkamere // Uchenye zapiski CAGI. – 1989. Tom XX. №3. S.37...43.

2. Rahmatulin H.A., Guvernjuk S.V., O postanovke zadach obtekanija pronicaemyh tel neszhimaemoj sredoj // V sb.: Parashjuty i pronicaemye tela. – М.: Изд-во Моск. un-ta., 1987. S. 5...24.

3. Xudong A., Howard F., Srinath I. Experimental investigation of air vortex interaction with porous screen // Proceedings of the ASME 4-th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM, August 3-7, 2014, Chicago, Illinois, USA).

4. Dynnikova G.Ja. Lagranzhev podhod k resheniju nestacionarnyh uravnenij Nav'e-Stoksa // Dokl. RAN. – 2004. Т. 399, №1. S. 42...46.

5. Andronov P.R., Guvernjuk S.V., Dynnikova G.Ja. Vihrevye metody rascheta nestacionarnyh gidrodinamicheskikh nagruzok. – М.: Изд-во Моск. un-ta, 2006.

6. Andronov P.R., Gircha A.I., Guvernjuk S.V. O stabilizacii ulovlennogo vihrja v kaverne s pomoshh'ju pronicaemoj kryshki // Sovremennye problemy matematiki i mehaniki. – Том II. Mehanika. Vyp. 1 / Pod red. akad. G.G. Chernogo i prof. V.P. Karlikova. – М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 33...41.

7. Castro I.P. Some problems concerning the production of a linear shear flow using curved wire-gauze screens // J. Fluid Mech. – Vol. 76, Part 4, 1976.

8. Gagarin V.G., Guvernjuk S.V., Kubenin A.S. i dr. K metodike rascheta vlijanija vetrovyh vozdeystvij na vozdushnyj rezhim zdaniy // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2016, № 4. S. 234...240.

9. Gagarin V.G., Kozlov V.V., Lushin K.I., Pastushkov P.P. O primenenii vetrogidrozashhitnyh membran v navesnyh fasadnyh sistemah s ventiliruemoj vozdushnoj proslojkoj. // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. – 2012, № 5. S. 128...131.

10. Gagarin V.G., Kozlov V.V., Lushin K.I., Pastushkov P.P. K voprosu o primenenii vetrogidrozashhitnyh membran v navesnyh fasadnyh sistemah s ventiliruemoj vozdushnoj proslojkoj. // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. – 2013, № 3. S. 120...122.

11. Andronov P.R., Guvernyuk S.V. The streamline flow around a permeable plate in a plane-parallel channel. // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. –Vol.79, №3, 2015. P. 270...280.

Рекомендована Ученым советом НИИСФ РААСН. Поступила 03.04.17.