



# Практическое применение явления аномально высокой амплитуды автоколебательного процесса при истечении жидкости. Часть 1

Рецензия эксперта на статью получена  
13.06.2019 [Expert review on the article  
received June 13, 2019].

## Введение

Автоколебательные течения из отверстий, перекрытых арочным элементом, представляют большой практический и исследовательский интерес в научно-инженерных задачах распределения воздуха, диспергирования жидкостей, смешения плохо смешивающихся жидкостей, сжигания топлив. Однако работ по изучению механизма возникновения течения и характеристик автоколебательного процесса крайне мало.

Сегодня уже понятно, что обнаруженное аномально быстрое затухание результирующего потока вентиляционного воздуха в окружающей среде, отмеченное в [1], имеет в своей природе мощный автоколебательный процесс.

Это первое в литературе упоминание трактовалось как эффект соударения оппозитно-встречных струй в приложении к технике вентиляции.

Взаимодействию двух встречно-соосных потоков посвящены работы [2, 3]. В работе [2] представлены результаты экспериментальных исследований течений воздуха из лункообразных отверстий. Установлено быстрое падение скорости потока вниз по течению от лункообразного отверстия. При объяснении

механизма гашения скорости потока при истечении из отверстия не был отмечен факт наличия колебательного процесса.

В работе [3] представлены первые попытки исследования процесса методами численного моделирования. Результаты расчётов показали наличие периодического автоколебательного течения. Проведена оценка влияния геометрических параметров отверстия на характеристики автоколебательного процесса.

Установлено, что спектр и амплитуда колебаний потока зависят от длины прямоугольного отверстия, отнесённой к его ширине.

**Сегодня уже понятно, что обнаруженное аномально быстрое затухание результирующего потока вентиляционного воздуха в окружающей среде, отмеченное в [1], имеет в своей природе мощный автоколебательный процесс. Это первое упоминание трактовалось как эффект соударения оппозитно-встречных струй в приложении к технике вентиляции**

УДК 697.932.6:1515. Научная специальность: 05.23.03.

## Практическое применение явления аномально высокой амплитуды автоколебательного процесса при истечении жидкости. Часть 1

Игорь В. Баранов, д.т.н., профессор; Сергей А. Гастев, аспирант, Санкт-Петербургский Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО)

Рассматривается истечение несжимаемой жидкости из прямоугольного отверстия перекрытого полукруглым арочным элементом. Численно исследован автоколебательный режим истечения. Вычислительный алгоритм, реализованный в программном комплексе STAR-CCM+, включает в себя сеточную аппроксимацию по пространству, неявный метод интегрирования по времени и алгебраический многосеточный метод решения систем алгебраических уравнений. Рассмотрен вариант геометрии отверстия с соотношением сторон  $l/d = 2$ . Дано объяснение механизму возникновения автоколебательного процесса. Определено распределение значений амплитуды колебаний в пространстве у выхода из отверстия. Определены некоторые возможности практического применения описанного явления.

**Ключевые слова:** уравнения Навье-Стокса, несжимаемая жидкость, турбулентное течение, автоколебания, численное моделирование.

UDC 697.932.6:1515. The number of scientific specialty: 05.23.03.

## Practical application of the phenomenon of abnormally high amplitude of the self-oscillating process at the expiration of the liquid. Part 1

Igor V. Baranov, Doctor of Technical Sciences, Professor; Sergey A. Gastev, postgraduate student, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (NRU ITMO)

The outflow of an incompressible fluid from a rectangular opening covered by a semicircular arched element is considered. The self-oscillatory expiration regime is numerically investigated. The computational algorithm implemented in the STAR-CCM+ software package includes a grid approximation in space, an implicit time integration method, and an algebraic multi-grid method for solving systems of algebraic equations. A variant of the hole geometry with an aspect ratio of  $l/d = 2$  is considered. An explanation is given to the mechanism of the self-oscillatory process. The distribution of oscillation amplitude values in space at the exit from the hole is determined. Some possibilities of practical application of the described phenomenon are determined.

**Key words:** Navier-Stokes equations, incompressible fluid, turbulent flow, self-oscillation, numerical simulation.

Первая попытка комплексного подхода к изучению механизма возникновения автоколебательного течения из отверстия, перекрытого арочным элементом, с применением методов численного моделирования представлена в работе [4]. Рассмотрены отверстия с различными геометрическими параметрами и при различных кинематических режимах течения.

Для диапазона чисел Рейнольдса ( $Re$ )  $2,1 \times 10^6 - 1,2 \times 10^7$  установлено, что автоколебательный характер течения не зависит от кинематических параметров течения, в частности,  $Sh \neq f(Re)$ . Однако установлена существенная зависимость амплитуды колебательного течения от величины отношения  $l/d$ .

При  $l/d = 1$  автоколебательный характер течения выражен слабее и имеет сниженную амплитуду колебаний. При  $l/d = 2$  наблюдается ярко выраженное автоколебательное течение. При  $l/d = 4$  также наблюдается автоколебательный характер течения, но, в отличие от предыдущих вариантов, этот процесс протекает менее периодически, появляются дополнительные гармоники колебаний, а амплитуда колебаний значительно снижается.

Определяя относительную амплитуду колебаний как отношение амплитуды колебаний модуля скорости потока к среднерасходной скорости, специалисты установили, что относительная амплитуда автоколебаний для иных видов автоколебательных течений, как правило, не превышает значения 0,9. Например, в работах [5–6], в которых исследуется истечение плоской струи в прямоугольную полость, относительная амплитуда автоколебаний не превышает значения 0,4. В работах [7–9], в которых исследуется автоколебательный процесс при обтекании тел

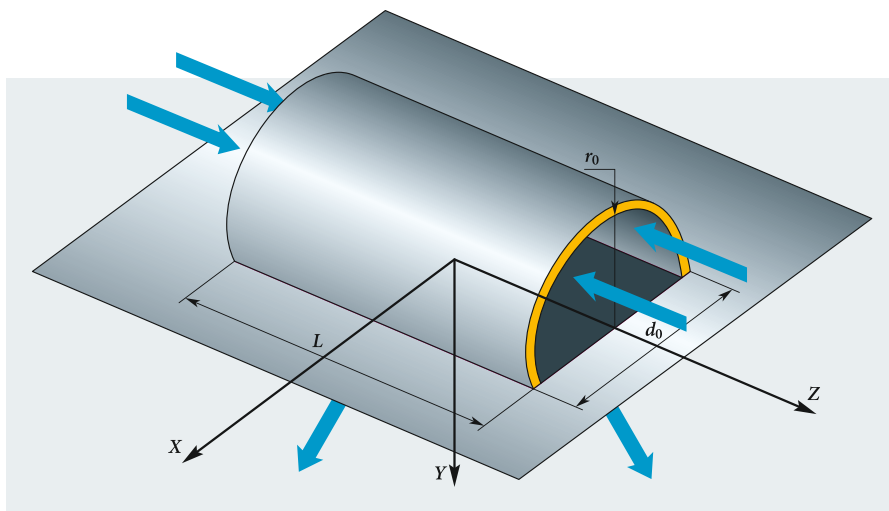


Рис. 1. Общий вид исследуемого прямоугольного отверстия, перекрытого арочным элементом

различной формы, относительная амплитуда колебаний также не превышает значения 0,9, а в работах [10–11], в которых исследуется автоколебательный процесс фонтанирования вертикальной плоской струи жидкости, относительная амплитуда колебаний не превышает значения 0,6.

В работах [12–13], в которых исследуется обтекание внешним потоком прямоугольных каверн при  $Re = 10^3 - 10^5$ , амплитуда автоколебаний не превышает значения 0,9.

**Относительная амплитуда автоколебаний для иных видов автоколебательных течений, как правило, не превышает значения 0,9. Например, в работах [5–6], в которых исследуется истечение плоской струи в прямоугольную полость, относительная амплитуда автоколебаний не превышает значения 0,4 (в работах [7–9] — 0,9)**

В настоящей работе численно исследуется автоколебательный режим истечения из отверстия, перекрытого арочным элементом. Главной целью исследования является выяснение механизма формирования автоколебательного течения, а также определение основных его характеристик. Рассматривается вариант геометрии отверстия с соотношением сторон  $l/d = 2$ , поскольку при данном соотношении наиболее ярко наблюдается автоколебательный режим истечения [4]. По результатам моделирования определяется распределение поля амплитуд колебаний в плоскости течения струи.

#### Постановка и метод решения задачи

Исследуется автоколебательное течение вязкого изотермического несжимаемого газа из прямоугольного отверстия, перекрытого арочным элементом (рис. 1).

Для описания трёхмерного турбулентного течения жидкости использовался метод крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) [14], базирующейся на решении отфильтрованных по пространству уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности (1.1–1.2):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \nu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij}^{SGS} \right], \quad (1.2)$$

здесь  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости;  $\bar{u}_i$  и  $\bar{p}$  — отфильтрованные по пространству компоненты скорости и давление, соответственно.

Крупномасштабные вихри разрешаются напрямую из уравнений (1.1–1.2), а мелкомасштабные вихревые структуры моделируются в соответствии с моделью подсеточной вязкости (SubGrid-Scale, SGS) Смагоринского.



В соответствии с моделью Смагоринского делаются два допущения. Во-первых, предполагается линейная связь между тензором подсеточных напряжений и тензором скоростей деформации:

$$\tau_{ij}^{SGS} - \frac{1}{3} \tau_{ij} \delta_{ij} = -2 \nu_t \bar{S}_{ij};$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right),$$

где  $\bar{S}_{ij}$  — тензор скоростей деформации, построенный по осреднённым значениям скорости;  $\nu_t$  — подсеточная вихревая вязкость. Во-вторых, по аналогии с моделью длины смещения [14] для расчёта подсеточной вязкости:

$$\nu_t = l_s^2 |\bar{S}| = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}|,$$

здесь  $|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ji}}$ ;  $l_s = C_s \Delta$ , где  $\Delta$  — ширина фильтра;  $C_s$  — константа Смагоринского.

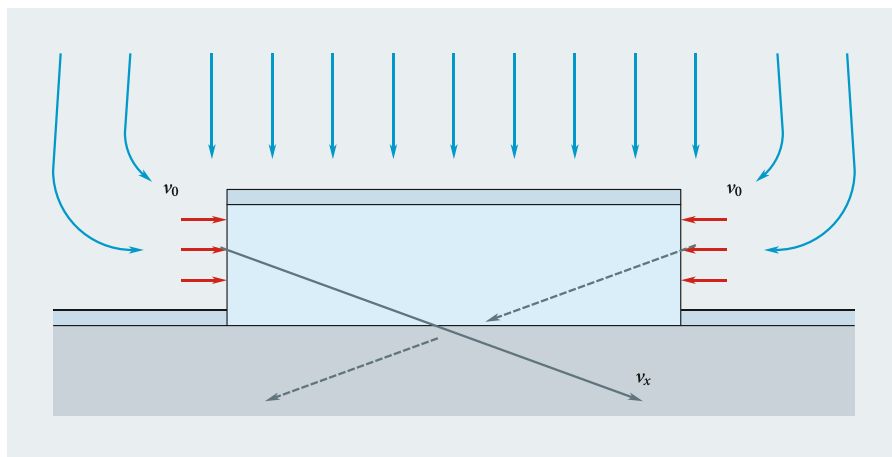


Рис. 2. Схема расположения отверстия на плоскости и направление потока

На рис. 2 показана схема отверстия, площадь входного сечения которого равна 0,15 м<sup>2</sup>, а скорость во входном сечении в расчётную область составляет 0,039 м/с. Скорость во входном сечении определяется из условия, что скорость потока из отверстия арочного элемента составляет  $v_0 = 3$  м/с, а площадь прямоугольного отверстия равна 0,005 м<sup>2</sup>. На выходной границе расчётной области распределение давления  $p = \text{const}$  и условие Неймана на тангенциальные компоненты скорости  $du_\tau/d\eta = 0$ . Все остальные границы расчётной области предполагаются твёрдыми стенками и на них ставятся условия прилипания.

Для решения поставленной задачи использовался вычислительный программный комплекс STAR-CCM+ (ver. 8). Пространственная аппроксимация уравнений переноса (1.1–1.2) выполняется с помощью метода контрольных объёмов. Для интегрирования по времени используется неявная схема первого порядка точности.

Аппроксимация конвективных членов в уравнении переноса импульса (1.1) выполняется по схеме центральных разностей второго порядка точности. Решение систем алгебраических уравнений, формируемых при дискретизации уравнений

**Для решения поставленной задачи использовался вычислительный программный комплекс STAR-CCM+. Пространственная аппроксимация уравнений переноса (1.1–1.2) выполняется с помощью метода контрольных объёмов. Для интегрирования по времени используется неявная схема первого порядка точности. Аппроксимация конвективных членов в уравнении переноса импульса (1.1) выполняется по схеме центральных разностей второго порядка точности**

переноса, производится алгебраическим многосеточным методом [15].

В исследуемой области построена гексаэдральная неструктурированная расчётная сетка с более подробным разрешением в области отверстия. Размер элемента расчётной сетки в области максимального сужения составляет 0,3 мм, а максимальный размер элемента расчётной сетки составляет 80 мм.

Общее количество ячеек расчётной сетки составило  $22 \times 10^6$ .

### Механизм возникновения автоколебаний

Для понимания особенностей механизма возникновения автоколебаний при истечении жидкости из рассматриваемого отверстия необходимо точно воспроизвести картину течений и взаимодействий потоков между собой. Использование подхода LES позволяет получить подробную картину течения, напрямую разрешая наиболее крупные вихревые структуры потока, соответствующие длинноволновой части инерционного интервала энергетического спектра. На рис. 3–4 представлено развитие течения потока из отверстия за время одного полупериода его колебаний. Данное явление представляет собой динамически неустойчивое периодическое течение, вызванное сложным неустойчивым взаимодействием встречно-соосных потоков, истекающих через отверстие.

### Характеристики автоколебаний

Интерес к данному виду автоколебательных течений вызван аномально высокой относительной амплитудой колебаний потока, которая, как следует из рис. 3а, принимает значения от 5,0 до 6,0.

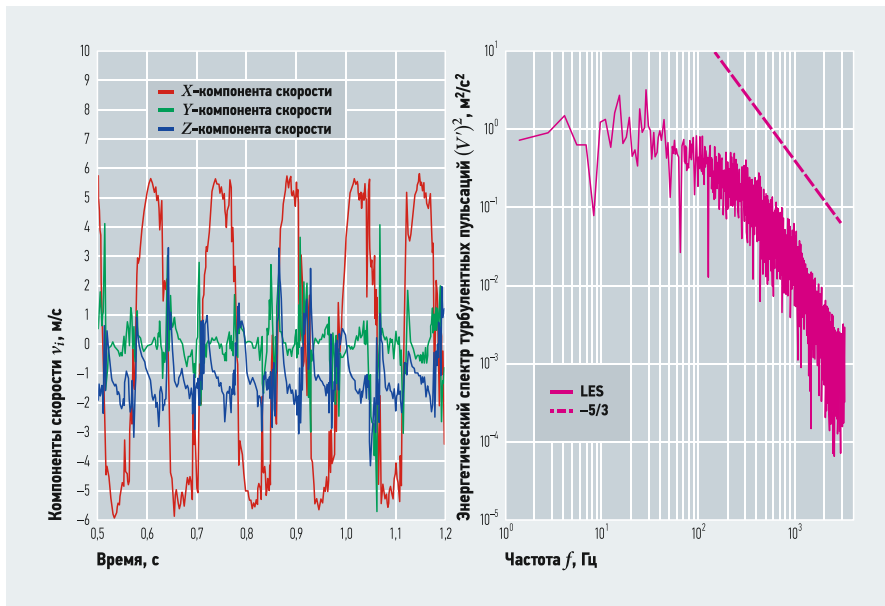


Рис. 3. Временная зависимость компонент скорости (а) и энергетический спектр турбулентных пульсаций (б) в точке, расположенной по центру отверстия (расчёт методом LES)

Для определения энергетического спектра турбулентных пульсаций потока (рис. 3б) и амплитуды колебаний по перпендикулярной и продольной осям отверстия (Y и X на рис. 2, соответственно) определяется временная зависимость всех компонент скорости (рис. 3а).

В результате анализа полученных данных определяется распределение амплитуды автоколебаний (рис. 4).

Значение амплитуды колебаний соответствует отношению максимальной поперечной компоненты скорости  $v_x$  к среднерасходной скорости из отверстия при заданных условиях:

$$A = v_x / v_{\text{расх.}}$$

Установлено, что максимальное значение амплитуды колебаний достигается по центру отверстия на расстоянии от 0 до 4 мм от плоскости отверстия (по оси Y, рис. 4а). Принимая во внимание, что пло-

щадь прямоугольного отверстия формируется как  $d_0 L = 0,05 \times 0,1 \text{ м}^2$ , можно полагать, что максимальные колебания обнаруживаются в плоскости данного конкретного отверстия.

### Вывод

Численно исследован автоколебательный процесс при истечении из прямоугольного отверстия с соотношением сторон 2:1, перекрытого арочным элементом. В рассмотренном варианте фигурирует отверстие с соотношением  $l/d_0 = 2$ .

Также дано объяснение механизму возникновения автоколебательного характера течения.

Сложное взаимодействие двух встречно-соосных потоков обеспечивает периодический подпор одного из них, как следствие организуя устойчивый колебательный характер течения.

При этом оказывается, что точки максимальных значений амплитуды колебательного процесса лежат практически в плоскости отверстия, отступая от неё на расстояние 2–4 мм.

Относительная амплитуда автоколебаний рассматриваемого течения anomalно высока и принимает значения 5,0–6,0, в то время как в иных известных автоколебательных течениях она составляет 0,4–0,9. Видно, что соразмерный рост амплитуды составляет 5,0–15,5 раз.

Описанному выше явлению мы дали название АВААК.

АВААК — это явление anomalно высокой амплитуды автоколебательного процесса при истечении ньютоновской жидкости из прямоугольного отверстия, перекрытого арочным элементом.

1. Юрманов Б.Н., Гурьянов М.Ю. Воздухораспределитель для подачи воздуха в рабочую зону / Исследования в области отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: Межвуз. тематич. сб. тр. — Ленинград: ЛИСИ, 1988. С. 22–26.
2. Авдеева Т.П. Лункообразные воздухораспределители. Рук. деп. №11532. — М.: ВИНТИ РАН, 1995. 23 с.
3. Авдеева Т.П. Воздухораспределение динамически неустойчивыми потоками: Автореф. дисс. д-ра техн. наук по спец. 05.23.03. — СПб., 2001. 37 с.
4. Денисшина Д.М. Численное моделирование автоколебательных вентиляционных течений: Дисс. канд. физ.-мат. наук по спец. 01.02.05. — СПб., 2005. 135 с.
5. Mataoui A., Schiestel R., Salem A. Study of the oscillatory regime of a turbulent plane jet impinging in a rectangular cavity. Applied Mathematical Modelling. 2003. Vol. 27. Pp. 89–114.
6. Денисшина Д.М., Бассина И.А., Никулин Д.А., Стрелец М.Х. Численное моделирование автоколебаний турбулентной струи, истекающей в прямоугольную полость // Теплофизика высоких температур, 2005. Т. 43. Вып. 4. С. 568–579.
7. Shur M., Spalart P.R., Strelets M.Kh. Navier-Stokes simulation of shedding turbulent flow past a circular cylinder and a cylinder with a backward splitter plate. Third ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conference. Paris, France. 1996. Pp. 676–682.
8. Hourigan K., Thompson M.C., Tan B.T. Self-sustained oscillations in flows around long blunt plates. Journal of Fluids and Structures. 2001. Vol. 15. Pp. 387–398.
9. Valencia A. Numerical study of self-sustained oscillatory flows and heat transfer in channels with a tandem of transverse vortex generator. Heat and Mass Transfer. 1998. Vol. 33. Pp. 465–470.
10. Карликов В.П., Трушина О.В. Об автоколебательных режимах истечения плоских струй жидкости из-под свободной поверхности // Труды Матем. института им. В.А. Стеклова, 1998. Т. 223. С. 52–62.
11. Карликов В.П., Толоконников С.Л., Трушина О.В. Об автоколебательных режимах фонтанирования плоских вертикальных затопленных струй тяжёлой жидкости в установках с придонным стоком // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2011. №3. С. 90–96.
12. Rowley C.M., Colonius T., Basu A.J. On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities. Journal of Fluid Mechanics. 2002. Vol. 455. Pp. 315–346.
13. Wang Z.K., Djambazov G., Lai C.H. Numerical simulation of flow-induced cavity noise in self-sustained oscillations. Computational Visual Media. 2007. Vol. 10. Pp. 123–134.
14. Smagorinsky J. General Circulation experiments with the primitive equations. The basic experiment. Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91. No. 3. Pp. 99–164.
15. Trottenberg U., Oosterlee C.W., Schuller A. Multigrid. London. Academic Press. 2001. 631 p. References — see page 94.

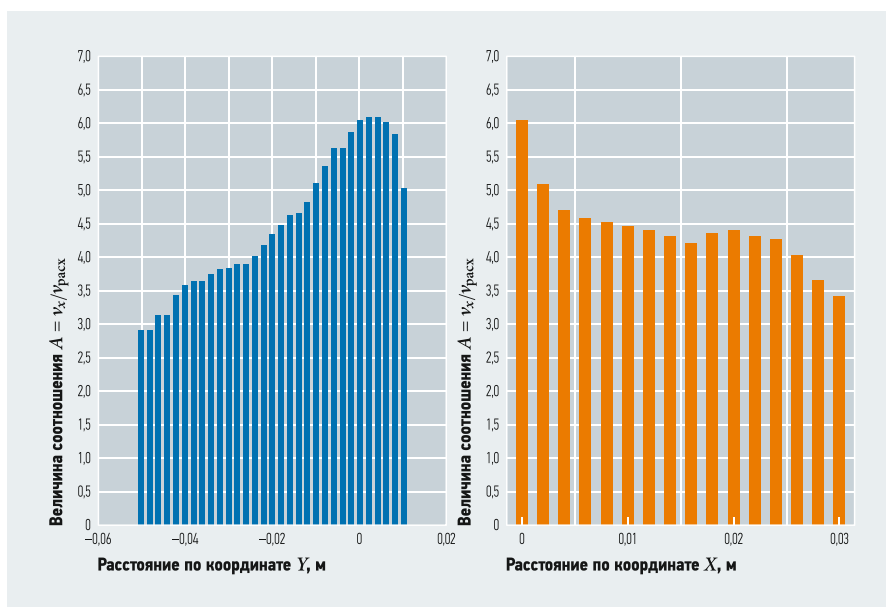


Рис. 4. Распределение значения относительной (а — вдоль оси Y, б — вдоль оси X; точка с координатами  $X = 0$ ,  $Y = 0$  расположена в центре отверстия)

**Practical application of the phenomenon of abnormally high amplitude of the self-oscillating process at the expiration of the liquid. Part 1. Pp. 66–69.**

**Igor V. Baranov**, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Sergey A. Gastev**, postgraduate student, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO)

1. Jurmanov B.N., Gur'janov M.Ju. *Vozduhoraspredelitel' dlja podachi vozduha v rabochuju zonu* [Air distributor for air supply to the working area]. *Issledovaniya v oblasti otopeniya, ventilatsii i kondicionirovaniya vozduha: Mezhevuz. tematich. sb. trudov* [Interuniversity thematic collection of papers "Research in the field of heating, ventilation and air conditioning"]. Leningrad. LISI [Leningrad Institute of Civil Engineering]. 1988. Pp. 22–26. [In Russian]
2. Avdeeva T.P. *Lunkoobraznye vozduhoraspredeliteli* [Alveolus-shaped air distributors]. *Ruk. dep. No. 11532* [The paper is deposited at No. 11532]. Moscow. VINITI RAN [All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences]. 1995. 23 p.
3. Avdeeva T.P. *Vozduhoraspredelenie dinamicheski neustojchivymi potokami* [Air distribution by dynamically unstable flow]. *Avtoref. diss. d-ra tehn. nauk po spec. 05.23.03* [Abstract of the thesis of doctor of technical sciences in the specialty 05.23.03]. St. Petersburg. 2001. 37 p. [In Russian]
4. Denisihina D.M. *Chislennoe modelirovanie avtokolebatel'nyh ventiljacionnyh techenij* [Numerical modeling of self-oscillatory ventilation currents]. *Diss. kand. fiz.-mat. nauk po spec. 01.02.05* [The thesis of candidate of physical and mathematical sciences on the specialty No. 01.02.05]. St. Petersburg. 2005. 135 p. [In Russian]
5. Mataoui A., Schiestel R., Salem A. Study of the oscillatory regime of a turbulent plane jet impinging in a rectangular cavity. *Applied Mathematical Modelling*. 2003. Vol. 27. Pp. 89–114.
6. Denisihina D.M., Bassina I.A., Nikulin D.A., Strelec M.H. *Chislennoe modelirovanie avtokolebanij turbulentnoj strui, istekajushhej v prjamougol'nuju polost'* [Numerical simulation of self-oscillations of a turbulent jet flowing into a rectangular cavity]. *Teplofizika vysokih temperatur* [Thermal physics of high temperatures]. 2005. Vol. 43. No. 4. Pp. 568–579. [In Russian]
7. Shur M., Spalart P.R., Strelets M.Kh. Navier-Stokes simulation of shedding turbulent flow past a circular cylinder and a cylinder with a backward splitter plate. Third ECCOMAS CFD Conference. Paris, France. 1996. Pp. 676–682.
8. Hourigan K., Thompson M.C., Tan B.T. Self-sustained oscillations in flows around long blunt plates. *Journal of Fluids and Structures*. 2001. Vol. 15. Pp. 387–398.
9. Valencia A. Numerical study of self-sustained oscillatory flows and heat transfer in channels with a tandem of transverse vortex generator. *Heat and Mass Transfer*. 1998. Vol. 33. Pp. 465–470.
10. Karlikov V.P., Trushina O.V. *Ob avtokolebatel'nyh rezhimakh istechenija ploskih struj zhidkosti iz-pod svobodnoj poverhnosti* [On self-oscillatory regimes of outflow of flat liquid jets from under the free surface]. *Trudy Matem. instituta im. V.A. Steklova* [Proc. of the Steklov Institute of Mathematics]. 1998. Vol. 223. Pp. 52–62. [In Russian]
11. Karlikov V.P., Tolokonnikov S.L., Trushina O.V. *Ob avtokolebatel'nyh rezhimakh fontanirovaniya ploskih vertikal'nyh zatoplennyh struj tjazhjolj zhidkosti v ustanovkah s pridonnyim stokom* [On self-oscillatory modes of spouting of flat vertical submerged jets of heavy liquid in installations with bottom drain]. *Izvestia RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza* [Journal of Russian Academy of Sciences. Fluid and gas mechanics]. 2011. No. 3. Pp. 90–96. [In Russian]
12. Rowley C.M., Colonius T., Basu A.J. On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities. *Journal of Fluid Mechanics*. 2002. Vol. 455. Pp. 315–346.
13. Wang Z.K., Djambazov G., Lai C.H. Numerical simulation of flow-induced cavity noise in self-sustained oscillations. *Computational Visual Media*. 2007. Vol. 10. Pp. 123–134.
14. Smagorinsky J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. The Basic Experiment. *Monthly Weather Review*. 1963. Vol. 91. No. 3. Pp. 99–164.
15. Trottenberg U., Oosterlee C.W., Schuller A. *Multigrid*. London. Academic Press. 2001. 631 p.