Научная статья
УДК 532.517
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19203

# О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ВСТРЕЧНЫХ ПРИСТЕННЫХ СТРУЙ В ВЕНТИЛИРУЕМОЙ ПОЛОСТИ

**В. Р. Адиатуллин, С. А. Галаев, В. В. Рис,**
**М. А. Засимова, Н. Г. Иванов** ✉
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
✉ ivanov_ng@spbstu.ru

**Аннотация.** Представлены результаты численного моделирования течения жидкости в прямоугольном помещении при ее встречной подаче через два щелевых отверстия. Число Рейнольдса Re, построенное по высоте приточного отверстия, варьировалось в диапазоне от 20 до 140. Для рассмотренного соотношения длин сторон помещения, при $Re \geq 50$ развиваются интенсивные автоколебания вследствие неустойчивости, которая проявляется при взаимодействии приточных струй. Уже при значении $Re = 100$ течение приобретает хаотический характер со сплошным спектром частот. Значения числа Струхаля, соответствующие основной частоте колебаний, слабо зависят от Re и составляют примерно $3 \cdot 10^{-3}$.

**Ключевые слова:** численное моделирование, плоская струя, вентилируемая полость, автоколебания

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00437.

**Для цитирования:** Адиатуллин В. Р., Галаев С. А., Рис В. В., Засимова М. А., Иванов Н. Г. О неустойчивости встречных пристенных струй в вентилируемой полости // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 2. С. 27–38. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19203

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Original article
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19203

# ON THE INSTABILITY OF COUNTERFLOWING WALL JETS IN A VENTILATED CAVITY

**V. R. Adiatullin, S. A. Galaev, V. V. Ris,**
**M. A. Zasimova, N. G. Ivanov** ✉
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
✉ ivanov_ng@spbstu.ru

**Abstract.** The paper presents the results of numerical simulation of fluid flow in a rectangular room when fluid is supplied from two opposing slotted holes. The Reynolds number (Re) based on the height of the supply opening was varied from 20 to 140. For the given ratio of the lengths of the sides of the room, intensive self-oscillations developed due to instability arising when the supply jets interacted at $Re \geq 50$. Already at a value of $Re = 100$ the flow became chaotic with a continuous frequency spectrum. The Strouhal number values corresponding to the main frequency of the oscillations depended weakly on Re and were approximately $3 \cdot 10^{-3}$.

**Keywords:** numerical simulation, plain jet, ventilated cavity, self-oscillations

**Funding:** The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 24-19-00437).

© Адиатуллин В. Р., Галаев С. А., Рис В. В., Засимова М. А., Иванов Н. Г., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

**For citation:** Adiatullin V. R., Galaev S. A., Ris V. V., Zasimova M. A., Ivanov N. G., On the instability of counterflowing wall jets in a ventilated cavity, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (2) (2026) 27–38. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19203

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## Введение

При распространении струй в стесненном пространстве на фоне турбулентного движения со сплошным спектром частот могут развиваться устойчивые, статистически установившиеся крупномасштабные автоколебания струй [1]. Взаимодействия струй между собой и с твердыми стенками, в том числе возможность развития автоколебательных режимов струйных течений, широко исследовались ранее применительно к струйным системам управления в устройствах пневмоавтоматики [2]. Низкочастотные автоколебания могут возникать и при распространении струй воздуха в вентилируемых помещениях. Так, возможность возникновения автоколебаний при работе системы вентиляции в университетской аудитории продемонстрирована в расчетно-экспериментальной работе [3]. В этой статье представлен анализ воздухораспределения в реальном помещении, геометрия которого включала ряд мелких деталей, при этом вентиляция обеспечивалась четырьмя стандартными приточно-вытяжными устройствами (общее число приточных струй составило 16). Для столь усложненной конфигурации анализ причин возникновения автоколебаний затруднен и не гарантирует однозначных результатов.

В литературе по этой тематике представлен ряд работ, в которых возможные причины возникновения и условия поддержания устойчивых автоколебаний струйного течения обсуждаются для упрощенных конфигураций, при этом упрощения делаются как в части геометрии, так и в способе подачи струй. Например, в обзорной работе [4], посвященной анализу взаимодействия свободных сдвиговых слоев с препятствиями для упрощенных постановок, а также в экспериментальной работе [5], где рассмотрено распространение плоской струи в прямоугольной полости, высказаны предположения, что при развитии автоколебаний существенную роль играет влияние вторичного возвратного течения на поведение струи в ограниченном пространстве. Экспериментальные исследования, представленные в статьях [6, 7], в которых рассматривалось распространение круглой струи в модельной конфигурации, типичной для процессов литья, а также последующие расчеты (см. работы [8, 9]) позволили сделать определенное заключение об условиях, позволяющих реализовать автоколебательный режим течения. Обеспечить такой режим можно при наличии протяженного открытого участка границы стесненного пространства, дающего определенную свободу для втекания/вытекания жидкости из окружающей среды.

Указанные условия, разумеется, нетипичны для вентилируемых помещений. Тем не менее, именно обеспечение этого условия в тестовом эксперименте, описанном авторами работ [10, 11], когда плоская струя распространялась в модели помещения, представляющей собой прямоугольную вентилируемую полость с протяженными открытыми участками торцевой границы, позволило установить развитие автоколебательных режимов течения. Низкочастотные автоколебания плоской струи для данной геометрической конфигурации были воспроизведены и детально изучены в ходе двумерного (2D) и трехмерного (3D) численного моделирования методом решения нестационарных уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу (*англ.* 2D/3D Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes (URANS)), а также методом моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation (LES)) [11 – 13].

Нестационарность струйного течения, возникающая при распространении одиночной струи, может с еще большей долей вероятности проявляться при взаимодействии нескольких струй (что, в частности, продемонстрировано нами в статье [3]). Так, в экспериментальной работе [14] было установлено, что течение, возникающее при взаимодействии двух плоских струй, подаваемых навстречу друг другу в свободном

© Adiatullin V. R., Galaev S. A., Ris V. V., Zasimova M. A., Ivanov N. G., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

пространстве (вдали от верхней и нижней стенок полости), принципиально неустойчиво: поле давления периодически перестраивается, последовательно отклоняя струи вверх и вниз. Устойчивые автоколебания возникают и при истечении навстречу друг другу двух плоских пристенных струй: для прямоугольных полостей (модельных помещений) с различными геометрическими параметрами колебательный характер взаимодействия струй был получен экспериментально и численно (см. работы [15] и [16], соответственно).

Взаимодействие встречных припотолочных струй характерно для систем вентиляции салонов пассажирских самолетов. В работах [17 – 19] численно и экспериментально рассматривалась структура течения в условиях, типичных для таких вентиляционных систем, и во всех случаях регистрировались выраженные автоколебания. В работах [17, 18] расчетная область была приближена к модели салона самолета, при этом присутствовали загромождающие элементы, что затрудняло непосредственный анализ струйного течения. В экспериментальной работе [19] был принят ряд упрощений (плоские стенки и отсутствие загромождения), однако более предпочтительной для параметрического численного моделирования представляется максимально упрощенная постановка, предложенная в расчетной работе [20], в которой на противоположных торцевых стенках прямоугольного помещения симметрично размещены два щелевых приточных отверстия у потолка и два щелевых вытяжных отверстия в окрестности пола.

Геометрия и расход через каждое из приточных отверстий, принятые в работе [20], соответствуют тесту Нильсена, признанному вентиляционным сообществом [21, 22]; согласно этому тесту, воздушная струя подавалась из щелевого отверстия, расположенного под потолком. Экспериментальные данные, полученные через тест Нильсена, широко используются для валидации расчетных данных вплоть до настоящего времени (см., например, работу [23] 2025 года; в нашей работе [24] 2020 года представлен как достаточно полный обзор опубликованных работ на эту тему, так и ссылка на базу экспериментальных данных, имеющуюся в открытом доступе).

Основное внимание в статье [20] направлено на исследование нестационарности, вызванной подачей приточного воздуха с периодически меняющимся расходом. Однако, как можно предположить на основании результатов, полученных авторами статей [15, 16], даже при стационарных граничных условиях (при подаче постоянного расхода), взаимодействие встречных струй, ввиду проявления гидродинамической неустойчивости, должно приводить к возбуждению сильных низкочастотных автоколебаний, а это важное обстоятельство в статье [20] никак не обсуждается.

Цель настоящего исследования – проанализировать условия, приводящие к развитию автоколебаний при взаимодействии встречных струй в модельном помещении (полости).

Относительные размеры помещения и положение в нем входных/выходных отверстий соответствует постановке задачи, принятой в работе [20].

## Постановка задачи

Рассматривается течение жидкости в помещении, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда, геометрические размеры которого $3H \times H \times H$ (рис. 1). Жидкость подается через щелевые отверстия высотой $h_{in} = 0{,}056H$ (размещены в верхней части противоположных торцевых стенок), к которым присоединены подводящие каналы длиной $H$. Жидкость покидает помещение через вытяжные отверстия высотой $h_{out} = 0{,}16H$, размещенные на тех же стенках в окрестности пола. В расчетную область включены также отводящие каналы длиной $H$, присоединенные к вытяжным отверстиям. Ширина подводящих и отводящих каналов равна ширине помещения. Начало системы координат расположено в одном из нижних углов помещения, ось $x$ направлена в продольном направлении, ось $y$ – в вертикальном.

На поверхности входных сечений подводящих каналов (на рис. 1 эти границы обозначены Inlet-1 и Inlet-2) задаются однородные распределения скорости $V_0$. На поверхности выходных сечений отводящих каналов (Outlet-1 и Outlet-2) ставится мягкое выходное граничное условие: давление полагается заданным и постоянным. Остальные границы – непроницаемые стенки, на которых задается условие прилипания.

Численно решается система нестационарных уравнений Навье – Стокса. Рассматривается течение несжимаемой среды с постоянными физическими свойствами.

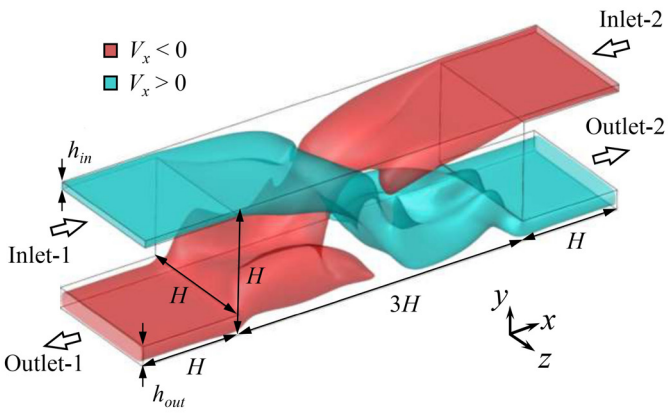



Рис. 1. Геометрическая модель расчетной области: Двумя изоповерхностями скорости $V_x > 0$ и $V_x < 0$ показана структура течения для числа Рейнольдса Re = 60; показаны высоты сечений входных – приточных ($h_{in}$) и выходных – вытяжных ($h_{out}$) отверстий, а также подводящих и отводящих каналов (соответственно), их границы обозначены как Inlet-1, Inlet-2 и Outlet-1, Outlet-2; фигурными стрелками указаны направления струй

Течение в полости характеризуется числом Рейнольдса $\mathrm{Re} = h_{in}V_0/\nu$, которое построено по высоте приточных отверстий и средней скорости на входе. Рассматриваются режимы течения со значениями Re от 20 до 140. Данный диапазон позволяет проводить расчеты в постановке, исключающей неопределенность, связанную с применением модели турбулентности. Он выбран нами примерно на два порядка ниже, чем значение числа Рейнольдса, принятое в работах [20 – 22], где $\mathrm{Re} = 5{,}5\cdot10^3$, что соответствует натурным условиям при вентиляции помещений. Выбранные нами уменьшенные значения Re можно трактовать как эффективные значения числа Рейнольдса, построенные по характерному уровню турбулентной вязкости, порожденной моделью турбулентности в слое смешения при натурном значении Re. Отметим также, что число Рейнольдса, построенное по высоте помещения $H$, для рассмотренных вариантов принимает значения в диапазоне $(0{,}36 – 2{,}68)\cdot10^3$ (в работе [15], например, значения Re определялись по величине $H$).

Параметрические расчеты в рассмотренном диапазоне числа Рейнольдса проводились на одной и той сетке, состоящей из 860 тыс. ячеек; сетка была сгущена к приточному и вытяжному отверстиям. Для варианта Re = 60 (нестационарное течение) было выполнено исследование чувствительности решения к используемой в расчетах сетке: использовались сетки, состоящие из 50, 370 и 860 тыс. ячеек. Уже на сетке размерностью 370 тыс. ячеек осредненные во времени поля слабо зависели от выбора сетки: распределения средней скорости, полученные на сетках из 370 и 860 тыс. ячеек практически совпали. С учетом того, что верхняя граница рассматриваемого диапазона Re выше, было принято решение использовать сетку максимальной размерности.

Задача решалась в гидродинамическом пакете ANSYS Fluent (версия 2022r1), в котором реализован метод конечных объемов. В пакете заданы следующие опции численного метода. Для расчета конвективных потоков через грани контрольного объема использовалась противопоточная схема второго порядка (опция “Second Order Upwind”). Для продвижения по времени использовалась неявная схема второго порядка. Шаг по времени задавался равным $0{,}15h/V_0$. Для получения осредненных параметров течения накапливались выборки, продолжительность которых составляла более 10 тыс. конвективных времен ($h/V_0$). Расчеты выполнены с использованием ресурсов суперкомпьютерного центра «Политехнический» (scc.spbstu.ru).

## Результаты расчетов и обсуждение

Изменение структуры течения с ростом числа Рейнольдса показано на рис. 2. Здесь приведены распределения модуля скорости в среднем вертикальном сечении помещения ($z = H/2$) и вертикальной компоненты скорости в среднем горизонтальном сечении помещения ($y = H/2$).

При малых значениях числа Рейнольдса (Re = 20 – данные I, Re = 40 – данные II) решение в ходе расчетов в нестационарной постановке сходилось к стационарному. В данном диапазоне значений числа Рейнольдса дальнобойность струй невелика: на небольшом расстоянии от приточного отверстия они, постепенно опускаясь к полу, разворачиваются на 180°, и жидкость направляется к соответствующим выходам. Чем выше значение числа Рейнольдса, тем дальше струя проникает вглубь полости, однако до тех пор, пока струи не начинают взаимодействовать друг с другом, течение остается стационарным.

Анализ данных на рис. 2 позволяет заключить, что стационарное течение в обоих случаях существенно трехмерно, хотя рассматривается распространение плоских струй. Такое утверждение следует из изогнутости полей вертикальной скорости в срединном горизонтальном сечении. Это свидетельствует о протяженной области влияния боковых стенок в поперечном направлении ввиду существенной роли вязких эффектов. В то же время стационарное течение симметрично в продольном направлении относительно срединного сечения $x = 1{,}5H$.

При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса дальнобойность струй постепенно растет, они достигают центра помещения и начинают взаимодействовать. Структура, которая формируется при совместном движении встречных струй, теряет устойчивость, течение в помещении становится нестационарным. В связи с этим на рис. 2 для значений Re = 60 и 100 показаны картины осредненного во времени поля скорости (данные III и IV). Уже при Re = 60 наблюдается квазипериодическое течение (структура обладает несколькими характерными частотами). Об этом свидетельствуют мгновенные поля скорости, показанные на рис. 3, а также эволюция компонент скорости в точке мониторинга (рис. 4, *a*). Все представленные сведения относятся к статистически установившемуся режиму течения (участку выборки, на котором обеспечена независимость средних значений от времени).

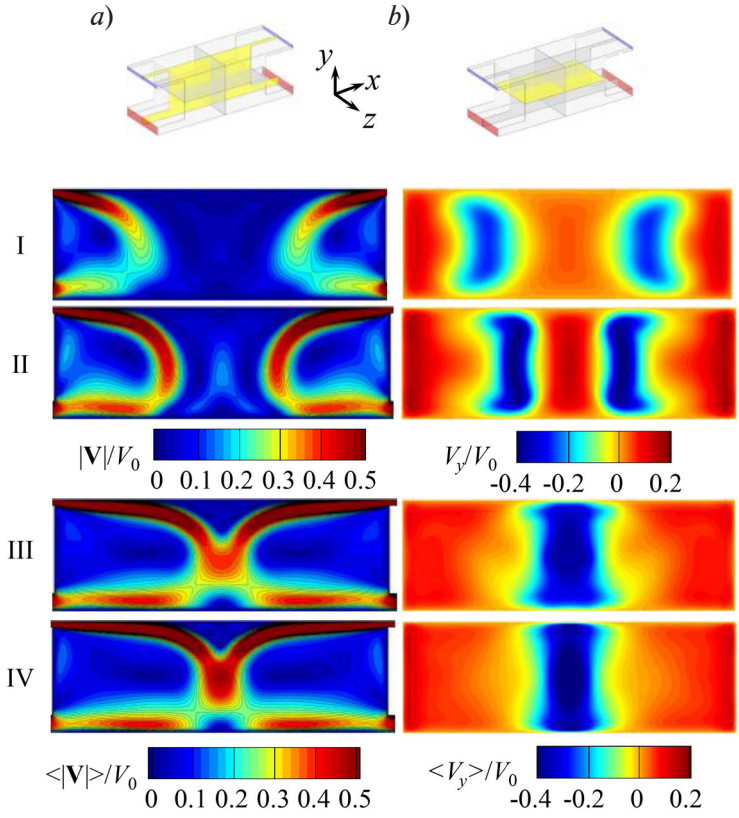



Рис. 2. Расчетные распределения модуля скорости в срединном вертикальном сечении $z = H/2$ (*a*) и вертикальной компоненты скорости в срединном горизонтальном сечении $y = H/2$ (*b*) (сечения показаны на схемах сверху) для разных значений числа Re: 20 (I), 40 (II), 60 (III) и 100 (IV).
В случаях I, II – решение стационарное; III, IV – нестационарное, поэтому даны распределения величин, осредненных во времени

Мгновенные поля скорости для режима нестационарного течения при Re = 60 показаны на рис. 3 для четырех моментов времени, которые составляют один период колебаний $T$ (см. рис. 4, *a*). Эволюция полей скорости во времени демонстрирует интенсивное взаимодействие струй, при этом встречные плоские струи сохраняют двумерную структуру только на начальном этапе своего движения, в центральной же области помещения они «сворачиваются», смещаясь каждая к одной из двух боковых стенок. В момент времени $t = T/4$ (среднее сечение $x = 1{,}5H$), в правой его части течение идет в положительном направлении оси $x$, а в левой – в отрицательном (см. картины II на рис. 3, *b*); в момент времени $t = 3T/4$ (см. рис. 4) направления меняются: в правой части течение распространяется в отрицательном направлении, в левой – в положительном (данные IV на рис. 3, *b*). Поочередная смена положения областей с противоположными направлениями движения сопровождается периодической деформацией нисходящего потока, который поворачивается вокруг вертикальной оси, что хорошо видно при сопоставлении полей II и IV на рис. 3, *a*. Восходящее движение на периферии помещения также демонстрирует сильную нестационарность: максимумы положительной вертикальной скорости вторичного течения периодически перемещаются из одного угла в противоположный (см. рис. 3, *a*).

Итак, моментальные поля скорости демонстрируют принципиально трехмерный характер нестационарного течения; дополнительно это иллюстрирует моментальная картина изоповерхностей продольной скорости (см. рис. 1). В то же время картина течения, осредненная во времени, оказывается достаточно однородной в поперечном направлении $z$; при этом с ростом числа Рейнольдса степень однородности возрастает, что следует из сопоставления полей осредненной вертикальной компоненты скорости в сечении $y = H/2$ для Re = 60 и 100 (см. рис. 2). В осредненном течении, струи, сталкиваясь в центральной части помещения, совместно спускаются вниз, по направлению к полу помещения, где снова происходит разделение потоков, и жидкость движется вдоль пола к вытяжным отверстиям; осредненные картины течения при Re = 60 и 100 представляют собой логичное продолжение стационарных картин течения при меньших значениях числа Рейнольдса.

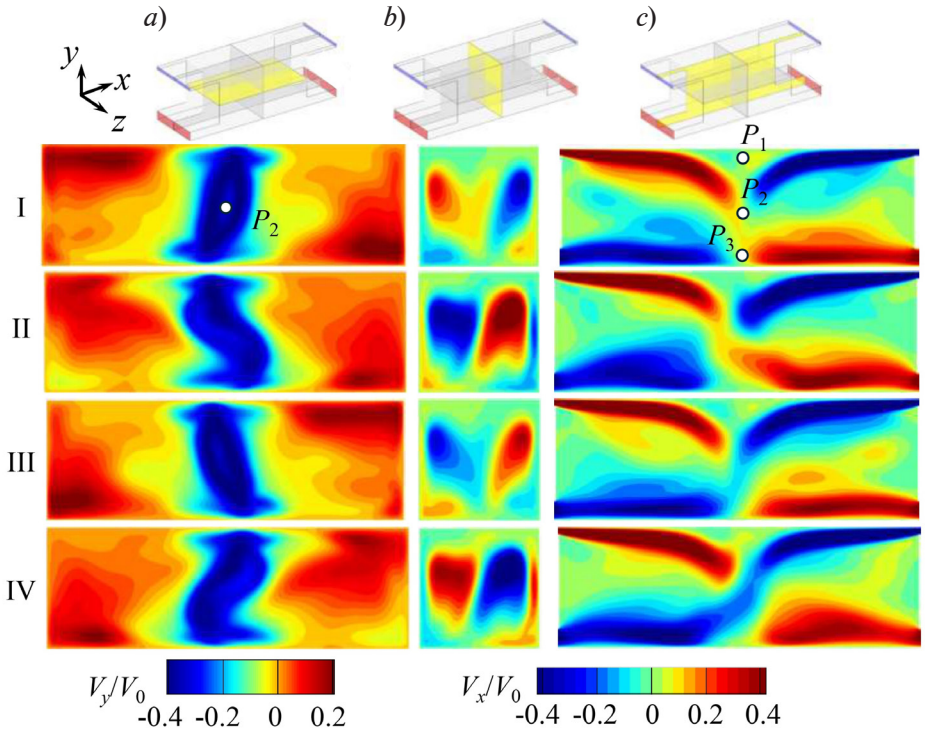



Рис. 3. Мгновенные распределения вертикальной (*a*) и продольной (*b*) компонент скорости, а также ее компоненты в трех средних сечениях помещения (*c*) в последовательные моменты времени $t$: 0 (I), $T/4$ (II), $T/2$ (III) и $3T/4$ (IV);
$T$ – период колебаний; $P_1 - P_3$ – точки мониторинга, Re = 60

Графики изменения во времени продольной и поперечной компонент скорости в трех точках мониторинга $P_1 - P_3$ для вариантов Re = 60 и 100 приведены на рис. 4. Точки расположены на пересечении срединных вертикальных сечений ($z = H/2$ и $x = 1{,}5H$), т.е. вдоль центральной линии помещения, на разной высоте:

точка $P_1$ находится на расстоянии полувысоты приточного отверстия от потолка ($y = H - h_{in}/2$),

точка $P_2$ – в центральной точке помещения ($y = H/2$),

точка $P_3$ – на расстоянии полувысоты вытяжного отверстия от пола ($y = h_{out}/2$).

При представлении данных, за масштаб времени принят ведущий (основной) период колебаний $T$. Оценка значения $T$ для каждого из вариантов выполнена на основе анализа энергетического спектра колебаний скорости.

Из анализа данных на рис. 4 следует, что режим течения при Re = 60 можно трактовать как квазипериодический, при этом наблюдается практически полная повторяемость (периодичность) характера изменения скорости в последовательные периоды колебаний, несмотря на наличие нескольких частот. В энергетическом спектре имеется ярко выраженная основная частота; соответствующее ей значение числа Струхаля $\mathrm{Sh} = h_{in}/TV_0$ составляет $2{,}5 \cdot 10^{-3}$. В центральной точке регистрируются интенсивные колебания, особенно заметные на графике эволюции компоненты $V_x$; знакопеременность продольной компоненты скорости отражает периодическую смену направления движения вдоль оси $x$ на противоположное. Несмотря на сравнительно близкое размещение точки $P_1$ от потолка, в ней регистрируются заметные колебания вертикальной компоненты скорости; при этом за один период колебаний $T$ возникают два максимума и два минимума, что говорит о поочередном влиянии струй из противоположных приточных отверстий на течение в этой точке. Амплитуда колебаний в точке $P_3$, находящейся в области низких скоростей, оказалась примерно на порядок ниже, чем в точках $P_1$ и $P_2$.

При значении Re = 100 изменение скорости в точках мониторинга приобретает случайный характер (см. рис. 4, *b*). Автоколебания становятся заметно интенсивнее: отклонение продольной компоненты скорости в центральной точке от среднего (нулевого) значения достигает $0{,}3V_0$. Следует отметить, что в этой точке возрастает по модулю и среднее значение вертикальной компоненты скорости $V_y$, что соответствует сужению центральной области с нисходящим течением на осредненной картине течения (см. рис. 2). Интенсивность колебаний увеличивается и в области низких скоростей (это точка мониторинга $P_3$).

Пространственное распределение интенсивности колебаний скорости для тех же самых нестационарных режимов (Re = 60 и 100) представлено на рис. 5. Здесь приведены поля среднеквадратичного отклонения (*англ.* Root Mean Square (RMS)) компоненты скорости $V_z$ в срединном вертикальном сечении $z = H/2$ и компоненты скорости $V_y$ в другом

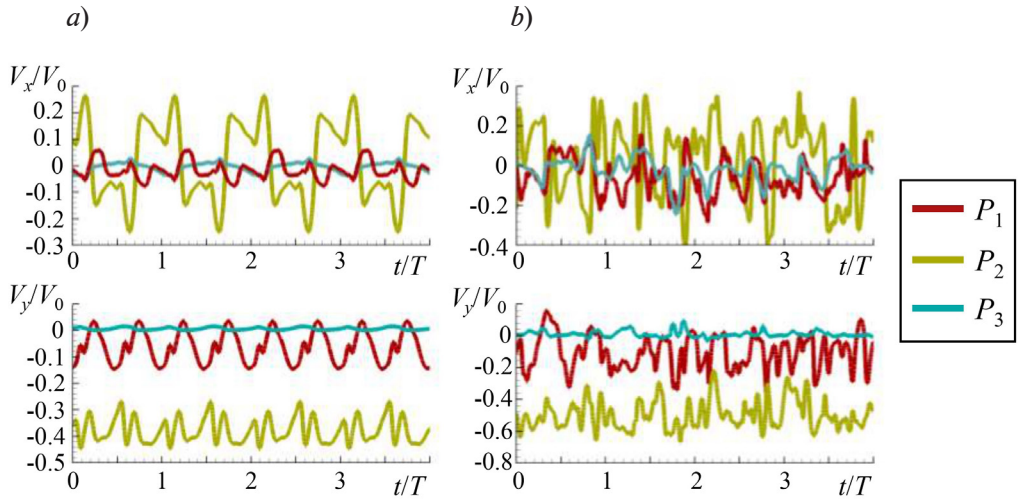



Рис. 4. Эволюция во времени продольной ($V_x$) и вертикальной ($V_y$) компонент скорости в трех точках мониторинга $P_1 - P_3$ при значениях Re = 60 (*a*) и Re = 100 (*b*)

срединном вертикальном сечении $y = H/2$ (оба распределения характеризуют интенсивность колебаний компоненты скорости, нормальной к данному сечению). Видно, что даже при Re = 60 колебания охватывают всю область течения; при этом локальные максимумы $V_y$ и $V_z$ в центральной части помещения дополнительно свидетельствуют об интенсивном перемещении нисходящей структуры, сформированной двумя струями, в поперечном направлении; кроме того, колебания, сопоставимые по интенсивности, зафиксированы в области вторичного течения. Сравнение пространственных распределений подтверждает вывод о заметном возрастании колебаний по мере увеличения числа Рейнольдса, сделанный ранее на основе локальных данных (см. рис. 4).

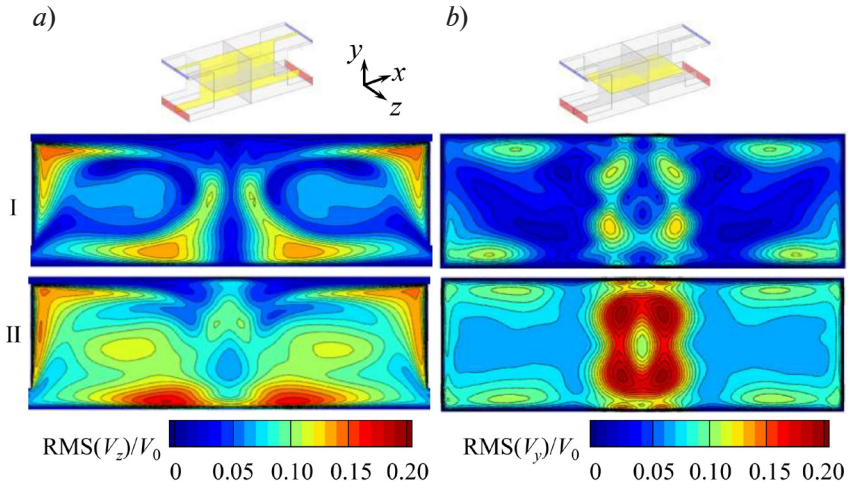



Рис. 5. Распределения среднеквадратичных отклонений компонент скорости $V_z$ (*a*) и $V_y$ (*b*) для значений числа Re = 60 (I) и Re = 100 (II)

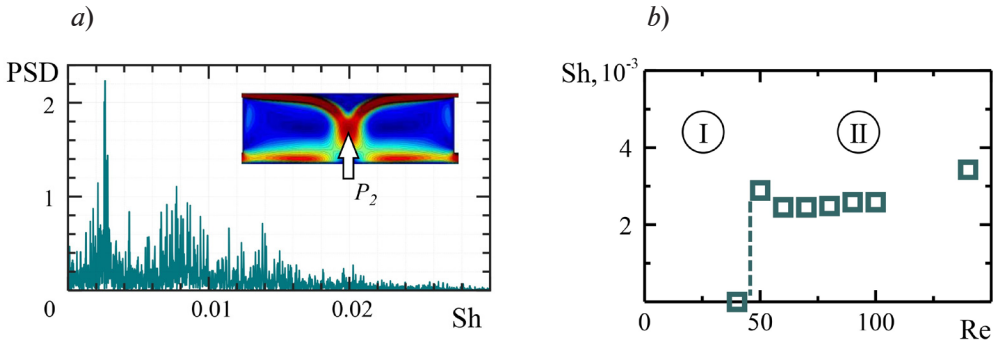



Рис. 6. Энергетический спектр колебаний компоненты скорости $V_x$ в центральной точке помещения $P_2$ при значении Re = 100 (*a*) и зависимость числа Струхаля от чисел Рейнольдса, построенная по результатам всех рассчитанных вариантов (*b*).
Вертикальная штриховая линия показывает границу между стационарным (I) и нестационарным (II) режимами

Энергетический спектр колебаний (*англ.* Power Spectral Density (PSD)) продольной компоненты скорости $V_x/V_0$, построенный на основе выборки в центральной точке помещения $P_2$ для Re = 100, показан на рис. 6, *a*. Видно, что течение характеризуется практически сплошным спектром колебаний поля скорости (для значения Re = 60 спектр дискретный) с выраженной основной частотой колебаний. Число Струхаля, соответствующее основной частоте, составило Sh = $2{,}6 \cdot 10^{-3}$, что лишь немного отличается от значения числа Струхаля, полученного для Re = 60.

На рис. 6, *b* сведены воедино все варианты проведенных параметрических расчетов: построена зависимость безразмерной частоты основной гармоники поля скорости от числа Рейнольдса. Вертикальная штриховая линия показывает границу между стационарным (I) и нестационарным (II) режимами течения: согласно результатам всех рассчитанных

вариантов, течение стационарное при значениях $Re \leq 40$, а когда числа $Re \geq 50$, развиваются автоколебания. В рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса безразмерная частота колебаний практически не меняется для нестационарных режимов течения. Значения числа Струхаля лежат в диапазоне $(2{,}5 – 3{,}4)\cdot 10^{-3}$.

**Заключение**

Представлены результаты трехмерного моделирования течения жидкости в прямоугольном помещении при ее встречной подаче через два щелевых отверстия, находящихся в верхней части противоположных торцевых стенок, и ее отводе через два щелевых отверстия в нижней части тех же стенок. Численно решена система нестационарных уравнений Навье – Стокса; расчеты выполнены в диапазоне значений числа Рейнольдса, которое построено по высоте приточного отверстия, от 20 до 150.

Показано, что течение, возникающее при встречной подаче двух плоских пристенных струй, оказывается неустойчивым, как только дальнобойность струй становится достаточной для их непосредственного взаимодействия. Для рассмотренного отношения длин сторон помещения при значениях $Re \leq 40$ течение стационарное, при $Re \geq 50$ развиваются интенсивные автоколебания. Наиболее интенсивные пульсации поля скорости фиксируются в центральной части помещения, где нисходящий поток, объединяющий две струи, совершает повороты вокруг вертикальной оси, периодически деформируясь.

Колебания основной нисходящий структуры распространяются и на вторичное восходящее течение. Нестационарное течение довольно быстро (уже при значении $Re = 100$) приобретает хаотический характер со сплошным спектром частот.

В рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса явно выражена основная частота колебаний, при этом значения числа Струхаля остаются практически неизменными и составляют примерно $3\cdot 10^{-3}$.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Moloy N. A., Taylor P. L.** Oscillatory flow of a jet into a blind cavity // Nature. 1969. Vol. 224. No. 5225. Pp. 1192–1194.

2. **Алферов В. В., Владимиров В. С., Новиков Б. К., Строгалев В. П., Масленников С. Л.** Струйная автоматика в системах управления. М.: Машиностроение, 1975. 367 с.

3. **Markov D., Ivanov N., Pichurov G., Zasimova M., Stankov P., Smirnov E., Simova I., Ris V., Angelova R., Velichkova R.** On the procedure of draught rate assessment in indoor spaces // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 15. P. 5036.

4. **Rockwell D., Naudasher E.** Self-sustained oscillations of impinging free shear layers // Annual Review of Fluid Mechanics. 1979. Vol. 11. January. Pp. 67–94.

5. **Maurel A., Ern P., Zielinska B. J. A., Wesfreid J. E.** Experimental study of self-sustained oscillations in a confined jet // Physical Review E. 1996. Vol. 5. No. 4. Pp. 3643–3651.

6. **Lawson N. J., Davidson M. R.** Crossflow characteristics of an oscillating jet in a thin slab casting mould // Journal of Fluids Engineering Transactions of the ASME. 1999. Vol. 121. No. 3. Pp. 588–595.

7. **Lawson N. J., Davidson M. R.** Self-sustained oscillation of a submerged jet in a thin rectangular cavity // Journal of Fluids and Structures. 2001. Vol. 15. January. Pp. 59–81.

8. **Bensider N., Mataoui A., Aksouh M.** Control of self-sustained jet oscillations in 3D thin rectangular cavity // Chemical Engineering Research and Design. 2017. Vol. 117. January. Pp. 533–541.

9. **Засимова М. А., Иванов Н. Г., Красикова А. Д.** Управление автоколебаниями круглой турбулентной струи, распространяющейся в узкой прямоугольной полости // Теплофизика и аэромеханика. 2024. Т. 31. № 4. С. 771–785.

10. **Mataoui A., Schiestel R., Salem A.** Flow regimes of interaction of a turbulent plane jet into a rectangular cavity: experimental approach and numerical modelling // Flow, Turbulence and Combustion. 2001. Vol. 67. No. 4. Pp. 267–304.

11. **Mataoui A., Schiestel R.** Unsteady phenomena of an oscillating turbulent jet flow inside a cavity: effect of aspect ratio // Journal of Fluids and Structures. 2009. Vol. 25. No. 1. Pp. 60–79.

12. **Денисихина 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. № 4. С. 568–579.

13. **Засимова М. А., Иванов Н. Г., Рис В. В., Степашева Е. Д.** Численное моделирование распространения турбулентной струи при истечении из щелевого отверстия в ограниченное пространство // Теплофизика и аэромеханика. 2025. Т. 32. № 3. С. 507–519.

14. **Денщиков В. А., Кондратьев В. Н., Ромашов А. Н.** О взаимодействии двух встречных струй // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1978. № 6. С. 165–167.

15. **Körner M., Shishkina O., Wagner C., Thess A.** Properties of large-scale flow structures in an isothermal ventilated room // Building and Environment. 2013. Vol. 59. January. Pp. 563–574.

16. **Wang C., Li Y., Ding P., Chen H., Zhang Y., Xing Y.** Analysis of airflow dynamics and instability in closed spaces ventilated by opposed jets using large eddy simulations // Buildings. 2025. Vol. 15. No. 10. P. 1707.

17. **Yang C., Zhang X., Yao Z., He F.** The large eddy simulation and stability analysis of flow field in a generic cabin // Procedia Engineering. 2015. Vol. 121. December. Pp. 1749–1756.

18. **Li J., Liu J., Wang C., Wesseling M., Müller D.** PIV experimental study of the large-scale dynamic airflow structures in an aircraft cabin: Swing and oscillation // Building and Environment. 2017. Vol. 125. No. 2. Pp. 180–191.

19. **Thysen J. H., van Hooff T., Blocken B., van Heijst G. J. F.** Instantaneous characteristics of interacting opposing plane jets in a generic enclosure measured with PIV // Experiments in Fluids. 2023. Vol. 64. No. 1. P. 19.

20. **van Hooff T., Blocken B.** Mixing ventilation driven by two oppositely located supply jets with a time-periodic supply velocity: a numerical analysis using computational fluid dynamics // Indoor and Built Environment. 2020. Vol. 29. No. 4. Pp. 603–620.

21. **Nielsen P. V., Restivo A., Whitelaw J. H.** The velocity characteristics of ventilated rooms // Journal of Fluids Engineering. 1978. Vol. 100. No. 3. Pp. 291–298.

22. **Nielsen P. V.** Specification of a two-dimensional test case. Aalborg, Denmark: Aalborg University, November 1990. 15 p.

23. **Buri S., Larkermani E., Georges L.** Influence of the inlet boundary conditions on the LES performance for the cavity flow benchmark // E3S Web of Conferences. 2025. Vol. 672. December. P. 02018.

24. **Засимова М.А., Иванов Н.Г., Марков Д.** Численное моделирование циркуляции воздуха в помещении при подаче из плоской щели. II. LES-расчеты для помещения конечной ширины // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 3. С. 75–92.

## REFERENCES

1. **Moloy N. A., Taylor P. L.,** Oscillatory flow of a jet into a blind cavity, Nature. 224 (5225) (1969) 1192–1194.

2. **Alferov V. V., Vladimirov V. S., Novikov B. K., et al.,** Struynaya avtomatika v sistemakh upravleniya [Jet automation in control systems], Mashinostroyeniye Publishing, Moscow, 1975 (in Russian).

3. **Markov D., Ivanov N., Pichurov G., et al.,** On the procedure of draught rate assessment in indoor spaces, Appl. Sci. 10 (15) (2020) 5036.

4. **Rockwell D., Naudasher E.,** Self-sustained oscillations of impinging free shear layers, Ann. Rev. Fluid Mech. 11 (Jan) (1979) 67–94.

5. **Maurel A., Ern P., Zielinska B. J. A., Wesfreid J. E.,** Experimental study of self-sustained oscillations in a confined jet, Phys. Rev. E. 5 (4) (1996) 3643–3651.

6. **Lawson N. J., Davidson M. R.,** Crossflow characteristics of an oscillating jet in a thin slab casting mould, J. Fluids Eng. Trans. ASME. 121 (3) (1999) 588–595.

7. **Lawson N. J., Davidson M. R.,** Self-sustained oscillation of a submerged jet in a thin rectangular cavity, J. Fluids Struct. 15 (Jan) (2001) 59–81.

8. **Bensider N., Mataoui A., Aksouh M.,** Control of self-sustained jet oscillations in 3D thin rectangular cavity, Chem. Eng. Res. Des. 117 (Jan) (2017) 533–541.

9. **Zasimova M. A., Ivanov N. G., Krasikova A. D.,** Control of self-oscillations of a round turbulent jet propagating in a narrow rectangular cavity, Thermophys. Aeromech. 31 (4) (2024) 791–804.

10. **Mataoui A., Schiestel R., Salem A.,** Flow regimes of interaction of a turbulent plane jet into a rectangular cavity: experimental approach and numerical modelling, Flow Turbul. Combust. 67 (4) (2001) 267–304.

11. **Mataoui A., Schiestel R.,** Unsteady phenomena of an oscillating turbulent jet flow inside a cavity: Effect of aspect ratio, J. Fluids Struct. 25 (1) (2009) 60–79.

12. **Denisikhina D. M., Bassina I. A., Nikulin D. A., Strelets M. Kh.,** Numerical simulation of self-excited oscillation of a turbulent jet flowing into a rectangular cavity, High Temperature. 43 (4) (2005) 568–579.

13. **Zasimova M. A., Ivanov N. G., Ris V. V., Stepasheva E. D.,** Numerical modeling of the propagation of a turbulent jet flowing from a slot into a confined space, Thermophys. Aeromech. 32 (3) (2025) 623–635.

14. **Denshchikov V. A., Kondrat'ev V. N., Romashov A. N.,** Interaction between two opposed jets, Fluid Dyn. 13 (6) (1978) 924–926.

15. **Körner M., Shishkina O., Wagner C., Thess A.,** Properties of large-scale flow structures in an isothermal ventilated room, Build. Environ. 59 (Jan) (2013) 563–574.

16. **Wang C., Li Y., Ding P., et al.,** Analysis of airflow dynamics and instability in closed spaces ventilated by opposed jets using large eddy simulations, Build. 15 (10) (2025) 1707.

17. **Yang C., Zhang X., Yao Z., He F.,** The Large Eddy Simulation and stability analysis of flow field in a generic cabin, Procedia Eng. 121 (Dec) (2015) 1749–1756.

18. **Li J., Liu J., Wang C., et al.,** PIV experimental study of the large-scale dynamic airflow structures in an aircraft cabin: Swing and oscillation, Build. Environ. 125 (2) (2017) 180–191.

19. **Thysen J. H., van Hooff T., Blocken B., van Heijst G. J. F.,** Instantaneous characteristics of interacting opposing plane jets in a generic enclosure measured with PIV, Exp. Fluids. 64 (1) (2023) 19.

20. **van Hooff T., Blocken B.,** Mixing ventilation driven by two oppositely located supply jets with a time-periodic supply velocity: A numerical analysis using computational fluid dynamics, Indoor Built Environ. 29 (4) (2020) 603–620.

21. **Nielsen P. V., Restivo A., Whitelaw J. H.** The velocity characteristics of ventilated rooms, J. Fluids Eng. 100 (3) (1978) 291–298.

22. **Nielsen P. V.,** Specification of a two-dimensional test case, Aalborg University Publ., Aalborg, Denmark, November 1990.

23. **Buri S., Larkermani E., Georges L.,** Influence of the inlet boundary conditions on the LES performance for the cavity flow benchmark, E3S Web Conf. 672 (Dec) (2025) 02018.

24. **Zasimova M. A., Ivanov N. G., Markov D.,** Numerical modeling of air distribution in a test room with 2D sidewall jet. II. LES-computations for the room with finite width, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (3) (2020) 65–79.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**АДИАТУЛЛИН Владислав Рустамович** – *аспирант, инженер научно-образовательного центра «Компьютерные технологии в аэродинамике и теплотехнике» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.*

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

vlad-adia@mail.ru

**ГАЛАЕВ Сергей Александрович** – *кандидат технических наук, директор научно-образовательного центра «Компьютерные технологии в аэродинамике и теплотехнике» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.*

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

galaev@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-7964-0200

**РИС Владимир Вольдемарович** – *кандидат технических наук; отдал служению Политехническому университету пятьдесят восемь лет.*

**ЗАСИМОВА Марина Александровна** – *кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.*
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
zasimova_ma@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-4103-6574

**ИВАНОВ Николай Георгиевич** – *кандидат физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией гидродинамики, директор Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.*
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
ivanov_ng@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-9897-5401

## THE AUTHORS

**ADIATULLIN Vladislav R.**
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
vlad-adia@mail.ru

**GALAEV Sergey A.**
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
galaev@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-7964-0200

**RIS Vladimir V.**
*He dedicated 58 years to serving Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

**ZASIMOVA Marina A.**
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
zasimova_ma@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4103-6574

**IVANOV Nikolay G.**
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
ivanov_ng@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-9897-5401

*Статья поступила в редакцию 07.12.2025. Одобрена после рецензирования 12.12.2025. Принята 12.12.2025.*
*Received 07.12.2025. Approved after reviewing 12.12.2025. Accepted 12.12.2025.*

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2026