

The evolution of perturbations in submerged jets

D. A. Ashurov¹, V. V. Vedenev^{1,2}, L. R. Gareev¹, Ju. S. Zayko^{1,2}, O. O. Ivanov¹,
A. I. Reshmin¹, V. V. Trifonov¹, S. H. Teplovodskiy¹

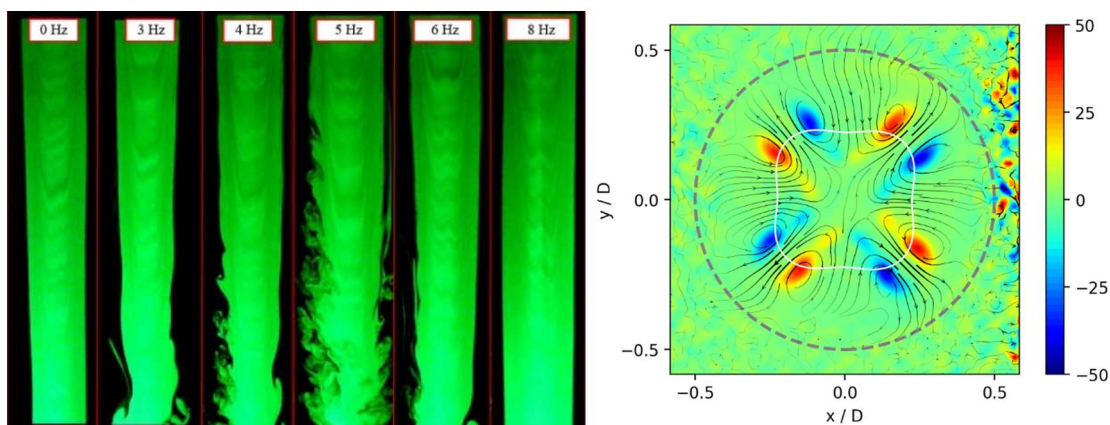
¹ *Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119192, Russia*

² *Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119991, Russia*
ivanov@imec.msu.ru

Abstract

This paper provides a review of the investigations performed at the Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, on the evolution of velocity perturbations that propagate in a submerged incompressible jet with an extended laminar region. The first part of the study is devoted to the modal mechanism of perturbation growth in the jet flow. We place thin rings oscillating at different frequencies in the jet at a small distance from the orifice to amplify the growing eigenmodes of the jet. Good agreement is shown between the experimental and theoretically predicted wavelengths, radial distributions of velocity fluctuations and the growth rate of eigenmodes. The second part of the review considers a non-modal (algebraic) mechanism of perturbation growth. Special wave-like structures (deflectors) which excite a «roller-like» transverse motion were introduced into the jet. The features of the transition to turbulence caused by such stationary perturbation are considered. Based on the experimental results, a non-modal growth mechanism of introduced perturbations, similar to the «lift-up» mechanism in wall-bounded flows, is identified. The development of disturbances qualitatively corresponds to the theoretical optimal disturbances of the jet. The third part of the paper presents computational study of algebraic growth of perturbations in round submerged jets with the Michalke velocity profiles. A parametric analysis of the optimal growth of spatial disturbances was conducted.

Keywords: submerged jet, linear stability analysis, optimal disturbances, non-modal growth, laminar-turbulent transition.



The jet flow visualization at different frequencies of introduced harmonic disturbances (on the left). Cross-sectional vorticity distribution of a disturbance developing according to a non-modal growth mechanism (on the right)

УДК 532.5.013.4

Эволюция возмущений в затопленных струях

Д. А. Ашуров¹, В. В. Веденеев^{1,2}, Л. Р. Гареев¹, Ю. С. Зайко^{1,2},
О. О. Иванов¹, А. И. Решмин¹, В. В. Трифонов¹, С. Х. Тепловодский¹

¹ НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119192, Мичуринский проспект, д.1

² Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119991, Ленинские горы, д.1

ivanov@imec.msu.ru

Аннотация

В данной статье приводится обзор работ, которые выполнялись в Институте механики МГУ, по исследованию эволюции возмущений, распространяющихся в затопленной струе с протяженным ламинарным участком. Затягивание ламинарно-турбулентного перехода обеспечивается разработанным уникальным формирующим устройством. Первая часть исследований посвящена модальному механизму роста возмущений в рассматриваемом течении. Тонкие, осциллирующие на разных частотах кольца помещались в струю на небольшом расстоянии от её начала для усиления растущих собственных мод струи. Показано хорошее соответствие экспериментальных и теоретически предсказанных длин волн, радиальных распределений пульсаций скорости и кривых усиления модальных возмущений. Во второй части исследований рассматривался немодальный (алгебраический) механизм роста возмущений. Для возбуждения алгебраического роста возмущений в струю вводились специальные волнообразные конструкции (дефлекторы), которые обеспечивают «валикообразное» поперечное движение в возмущенной струе. Рассмотрены особенности перехода к турбулентности, вызванные этим стационарным возмущением. На основании полученных экспериментальных результатов идентифицирован немодальный механизм роста вносимых возмущений, аналогичный «lift-up»-механизму в пристенных течениях. Развитие возмущений качественно соответствует полученным теоретически оптимальным возмущениям рассматриваемого течения. В третьей части представлены результаты расчетных исследований алгебраического роста возмущений в круглых затопленных струях с профилями скорости Михалке. Проведен параметрический анализ оптимального роста пространственных возмущений.

Ключевые слова: затопленная струя, линейная устойчивость течений, оптимальные возмущения, немодальный рост, ламинарно-турбулентный переход.

1. Введение

Затопленные струи часто встречаются в природе и широко используются в технологических процессах. Устойчивость струй и переход к турбулентности играют важную роль во многих их приложениях. Ламинарные струи на практике неустойчивы, так как имеют низкое критическое число Рейнольдса, которое не превышает 40 [1–3]. Такие струи имеют относительно небольшую область (длиной порядка 1–2 диаметров выходного сопла), в которой они сохраняют ламинарную структуру. По этой причине крайне сложно экспериментально изучать механизмы роста возмущений в ламинарной области обычных струй. Знание особенностей развития возмущений согласно таким механизмам, безусловно, дало бы лучшее понимание ламинарно-турбулентного перехода и обосновало применение тех или иных стратегий управления переходом, например, для максимального затягивания ламинарно-турбулентного перехода в струе или, наоборот, для максимально быстрой турбулизации и перемешивания струи с окружающей средой.

Можно с уверенностью утверждать, что в ламинарных струях модальный механизм роста возмущений играет первостепенную роль в их переходе к турбулентности. Он приводит к образованию вихрей Кельвина – Гельмгольца, обнаруживаемых в экспериментальных и численных исследованиях, и их дальнейшему развитию и разрушению. В немногочисленных экспериментах [4, 5] по внесению контролируемых возмущений в затопленную струю обычно наблюдалась короткая ламинарная область (длиной меньше одного диаметра), что не позволяло измерять длины волн и пространственные скорости роста внутри ламинарной области. Расстояние до перехода должно быть достаточно большим, чтобы захватить по крайней мере несколько длин волн, а сама струя должна иметь диаметр намного больше, чем размер контрольного объема средства измерения скорости (датчика термоанемометра, лазерного доплеровского анемометра и др.) для нивелирования ошибок измерения, что практически исключает из рассмотрения микроструи.

Разработанная в НИИ механики МГУ установка, детально описанная в работе [6], позволила существенно продвинуться в изучении поднятых выше вопросов. Она создает затопленную воздушную струю с протяженной ламинарной областью длиной $5D$ и более, где $D = 0.12$ м – диаметр выходного отверстия формирующего струю устройства. В создаваемое течение удобно вносить различные типы возмущений и отслеживать их эволюцию вниз по потоку. Так, используя теорию модальной устойчивости [7], были получены численные значения длин волн растущих возмущений, кривые усиления и радиальные распределения амплитуды возмущений. Те же параметры были измерены экспериментально – выявлено отличное соответствие предсказаний линейной теории, что в итоге подтвердило её применимость для затопленных струй.

Второе направление исследований было посвящено немодальному росту возмущений в рассматриваемом струйном течении. Хорошо известно, что в дополнение к модальному линейному механизму роста в пристеночных течениях существуют два немодальных линейных механизма роста [8]: механизм Орра и механизм «lift-up». В то время как первый является чисто двумерным процессом и приводит к относительно слабому росту, второй, «lift-up», дает гораздо более сильный рост трехмерных возмущений и отвечает за обходной, или байпасный, переход к турбулентности в пристеночных течениях [7]. Появляющиеся в процессе этого типа ламинарно-турбулентного перехода полосчатые структуры экспериментально изучались в пристеночных пограничных слоях [12–16]. В неограниченных потоках, таких как затопленные струи, теоретический анализ немодального механизма роста начался только в последнее десятилетие [17–20]. В экспериментах этот механизм прежде выявлен не был.

Для возбуждения возмущений, растущих согласно немодальному механизму, в струю помещались специальные волнообразные конструкции (*дефлекторы*), которые обеспечивали вихревое, «валикообразное» поперечное движение. Были рассмотрены особенности перехода к турбулентности, вызванные этим немодальным ростом. На основе полученных экспериментальных результатов однозначно идентифицирован немодальный «lift-up» механизм роста вносимых возмущений. Прослежено развитие возмущений и проведено сравнение с теоретически рассчитанными оптимальными возмущениями [21, 22].

Нельзя не отметить ряд теоретических и расчетных работ, проводимых в НИИ механики и посвященных изучению плоских и осесимметричных затопленных струй [20, 23–26]. В работах [23, 24] была проанализирована неустойчивость плоских несжимаемых изотермических струй и показана принципиальная возможность существования абсолютной неустойчивости таких струй. В численном исследовании [25] изучалась эволюция пространственных возмущений в затопленной струе [6, 7] с протяженным ламинарным участком в плоскопараллельной, а затем и в пространственной постановке. Показано, что осесимметричные возмущения даже значительной начальной амплитуды не приводят к переходу к турбулентности. Наблюдающийся в эксперименте [7] переход может объясняться наличием неконтролируемых трехмерных возмущений. В исследовании [26] был предложен алгоритм для нахождения

геометрии формирующего устройства для создания затопленной струи с заданным профилем скорости и характеристиками устойчивости. В работе [20] для семейства круглых затопленных струй с профилем скорости Михалке [27] проведен анализ оптимального роста пространственных возмущений, исследовано влияние параметров профиля, числа Рейнольдса и частот возмущения на максимальный рост их кинетической энергии.

2. Описание экспериментальной установки

2.1. Формирующее струю устройство

В данной работе рассматривается струйное течение с увеличенным ламинарным участком, которое формируется устройством, состоящим из трех частей (рис. 1, *a*, *b*). Первая часть представляет собой перфорированную пластину, выравнивающую поток, поступающий из воздушной магистрали (диаметр входного сечения устройства составляет 0.04 м). Вторая часть – втулка с двумя металлическими сетками, которая снижает интенсивность турбулентности до 0.6 %. Третья часть – диффузор, расширяющий поток до диаметра $D = 0.12$ м. На его выходе расположена проницаемая перегородка из тканых металлических мелкоячеистых сеток, предотвращающую отрыв потока от стенок диффузора. Отметим, что геометрия диффузора была специально спроектирована так, чтобы не возникали отрывные зоны, и, следовательно, не возникало дополнительных источников пульсаций скорости. Подробное описание установки дано в статье [6].

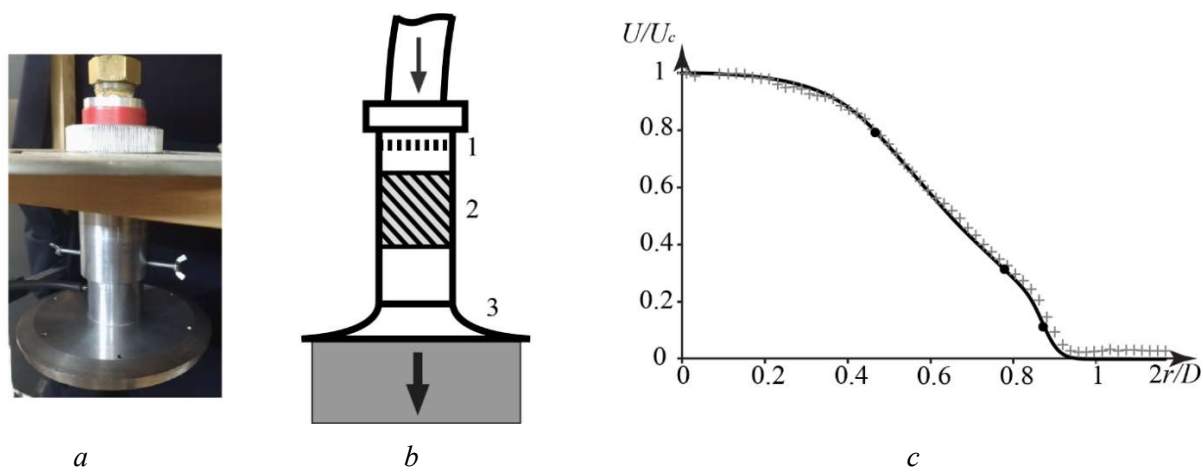


Рис. 1. *a*) Фотография формирующего устройства; *b*) схема формирующего устройства: 1 – перфорированная пластина, 2 – втулка с сетками, 3 – диффузор с сетками на выходе; *c*) профиль продольной скорости, измеренный непосредственно за диффузором (кресты), а также полученный с помощью численного моделирования [7] (сплошная линия)

Для рассматриваемого течения существует оптимальный диапазон чисел Рейнольдса, в котором длина ламинарной области максимальна ($\geq 5D$), что позволяет отслеживать эволюцию вносимых возмущений на больших расстояниях от выходного отверстия. В данном исследовании выбран один режим из этого диапазона, в котором поток воздуха имеет скорость на оси струи $U_c = 1.5$ м/с и среднюю скорость $U_{avg} = 0.66$ м/с, что соответствует числу Рейнольдса $Re_D = 5400$, рассчитанному по средней скорости и диаметру, и числу Рейнольдса, рассчитанному по максимальной скорости и радиусу струи $Re = 6122$. Для проведения теоретических исследований использовался профиль продольной скорости, который был получен с помощью численного моделирования истечения ламинарной затопленной струи из формирующего устройства и достаточно хорошо приближает измеренный профиль скорости (сплошная линия на рис. 1, *c*). Важно отметить, что эволюция невозмущенного профиля струи вниз по потоку слаба и не учитывается в теоретическом анализе [7].

2.2. Внесение гармонических возмущений

Оссимметричные возмущения являются одними из наиболее быстрорастущих для рассматриваемой струи и наиболее удобными для введения их в поток. Возмущения вносились механическим способом: на двух электроприводах на расстоянии $x = 19$ мм ($\approx 0.16D$) от выходного отверстия диффузора натягивались две тонкие металлические струны, а на струнах соосно струе закреплялось кольцо из проволоки (рис. 2) диаметром 1 мм. Приводы осуществляли колебания кольца в осевом направлении с заданной амплитудой и частотой.

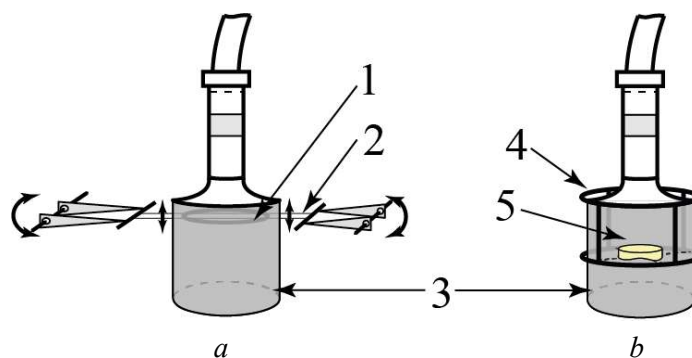


Рис. 2. Схемы внесения двух типов возмущений в затопленную струю. Для внесения гармонических возмущений (а) в струю (3) устанавливалось кольцо (1) на струнах (2), колеблющееся с заданной частотой и амплитудой. Для введения стационарных возмущений (b) дефлектор (5) закреплен на тонких лесках, прикрепленных к держателю (4). Дефлектор и кольцо расположены соосно струе

В каждой серии экспериментов использовалось одно из двух колец: первое кольцо имело диаметр 102.4 мм ($0.85D$), а второе кольцо – 56.9 мм ($0.47D$). Их размеры были выбраны следующим образом. Первое (большое) кольцо располагалось между двумя внешними обобщенными точками перегиба, которые создают первую ветвь растущих возмущений. Второе кольцо (меньшего диаметра) было расположено примерно под внутренней обобщенной точкой перегиба, которая соответствует второй ветви. Таким образом, большое и малое кольца должны усиливать возмущения первой и второй ветвей соответственно.

2.3. Внесение стационарных возмущений

Инициирование немодального механизма роста в экспериментах происходило с помощью неподвижных тонких волнообразных конструкций – дефлекторов. Они создают возмущение поля скорости, схожее в поперечном сечении с распределением скорости для рассчитанных оптимальных (т.е. наиболее быстрорастущих) возмущений (см. рис. 7 в статье [22]) и содержащее зоны ускорения и замедления частиц для создания пар продольных противорвращающихся вихрей. Использование таких неподвижных конструкций также оправдано тем, что стационарные оптимальные возмущения растут быстрее, чем нестационарные [17].

Верхний край дефлекторов представлял собой окружность радиусом $r_0 = D/4$ ($= 30$ мм), а нижний край – возмущенную окружность с заданным азимутальным волновым числом n и радиусом $r = \tilde{r}_0(1 + \varepsilon \sin(n\theta))$, где ε определяет безразмерную амплитуду отклонения от окружности, θ – полярный угол, а \tilde{r}_0 выбирался таким, чтобы площадь входного и выходного сечения дефлекторов совпадали. Высота дефлектора между верхним и нижним краями составляла $h = D/12$ ($= 10$ мм), а толщина стенки – $0.005D$ ($= 0.6$ мм). Между краями был выполнен плавный переход (точки верхнего и нижнего краев с одинаковым значением θ были соединены отрезками прямых). Дефлекторы были напечатаны на 3D-принтере из PLA-пластика. Внутри струи они крепились с помощью специального держателя (рис. 2, b). Нижняя кромка дефлекторов располагалась на натянутых лесках диаметром 0.05 мм. Дефлекторы

устанавливались внутри струи соосно с ней так, что расстояние от отверстия формирующего устройства до их входной кромки равнялось $x \approx 0.17D$ ($= 20$ мм).

3. Результаты экспериментальных исследований

3.1. Исследование модального механизма роста возмущений

Для анализа эволюции структуры течения при внесении контролируемых возмущений в первую очередь был применен наиболее простой и наглядный метод – визуализация течения. В воздушную магистраль перед формирующим устройством добавлялся аэрозоль из мелкодисперсных капель водного раствора глицерина. Струя подсвечивалась лазерным ножом, создаваемым непрерывным зелёным лазером с цилиндрической линзой. Некоторые результаты визуализации течения приведены на рис. 3. Как видно из них, колебания большого кольца существенно влияют на протяженность ламинарной области струи для физических частот $\Omega \approx 5$ Гц, соответствующих теоретическому диапазону частот наиболее быстрорастущих возмущений (см. рис. 7 в статье [7]).

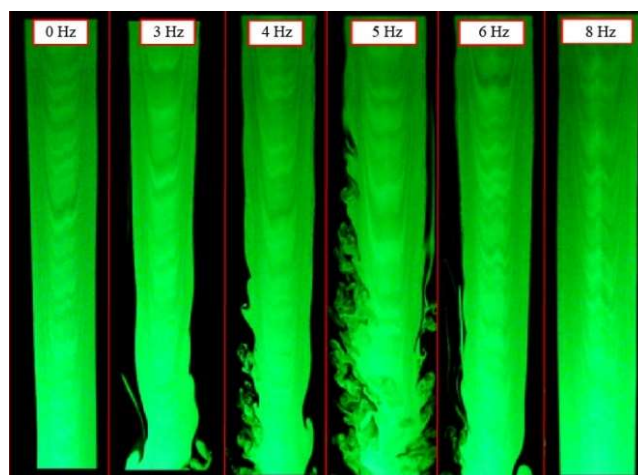


Рис. 3. Фотографии струи при колебаниях большого кольца с разными частотами при постоянной амплитуде скорости колебаний кольца

Напротив, для частот ниже 4 Гц и выше 6 Гц эффект колебаний кольца затухает с уменьшением и увеличением частоты соответственно (более подробную последовательность кадров см. на рис. 14 в работе [7]). Для этих частот возбуждения видно небольшое влияние на течение: на границе струи возникают синусоидальные волны, но они не развиваются в вихри Кельвина-Гельмгольца и не разрушают поток вплоть до его ядра, в котором пульсации скорости увеличиваются без внешнего возбуждения, а именно до $x/D = 5$ [6]. Обратим внимание, что невозмущенная струя выглядит ламинарной даже на расстоянии $6D$ от выходного отверстия, но уровень пульсаций скорости на таком расстоянии уже не мал. Дальнейшее увеличение частоты возбуждения не приводит к видимому влиянию на струю.

Было также проведено количественное сравнение предсказаний линейной теории устойчивости и результатов эксперимента. Для этого производилось одновременное измерение пульсаций скорости и положения кольца. Скорость потока измерялась при помощи термоанемометра DISA 56C01 СТА. Датчик термоанемометра располагался на конце Г-образной державки, движение которой в поперечном и продольном направлениях течения струи контролировалось с ПК при помощи программы, разработанной в среде LabView. Колебания кольца фиксировались лазерным триангуляционным датчиком RIFTEK RF603. После фильтрации сигналов в узкой полосе ± 0.5 Гц относительно опорной частоты были построены корреляции этих двух сигналов как функции двух пространственных (радиальной и продольной) координат.

нат. Длины волн возмущений первой моды, полученные из корреляционных картин и визуализации (измерения длин волн на границе струи), хорошо согласуются друг с другом и с теоретически предсказанными длинами волн с помощью анализа линейной устойчивости, как показано на рис. 4.

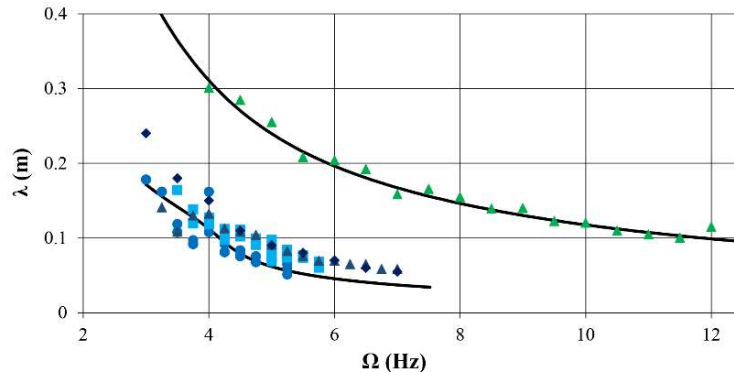


Рис. 4. Сравнение теоретических (сплошные линии) и экспериментальных (маркеры) длин волн возмущений для первой (снизу) и второй (сверху) ветвей. Длины волн, полученные при помощи корреляционных картин, обозначены ромбиками и зелёными треугольниками, остальные – получены при обработке визуализаций

Теоретические кривые показаны для профилей скорости на расстояниях $x/D = 0.5$ для обеих ветвей. Для второй ветви экспериментальные значения были получены только методом корреляционных картин. При той же амплитуде колебаний малого кольца, что и для большого, визуально заметного возмущения границы струи не наблюдалось; т.е. вторая мода была локализована внутри струи. Тем не менее наблюдается отличное согласие между экспериментальными точками и теоретическими результатами.

Радиальное распределение пульсаций скорости. Для первой ветви экспериментальные радиальные распределения пульсаций скорости (отфильтрованные полосовым фильтром вблизи значения частоты колебаний кольца) на расстояниях $x/D = 0.5$ и 1 соответствуют теоретическим радиальным распределениям амплитуды $F(r)$ осевой пульсации скорости $u_x(x, r, t) = F(r) \exp(i(\alpha x - \omega t))$, полученным в расчетах с профилями на тех же расстояниях (рис. 5). Наблюдается хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов, а различие между ними есть только вблизи границы струи ($2r/D \approx 1$), где оно обусловлено ошибкой измерения очень малой скорости датчиком термоанемометра, что также выливается и в различие между фактическим профилем скорости и профилем, используемым в расчетах по линейной теории устойчивости.

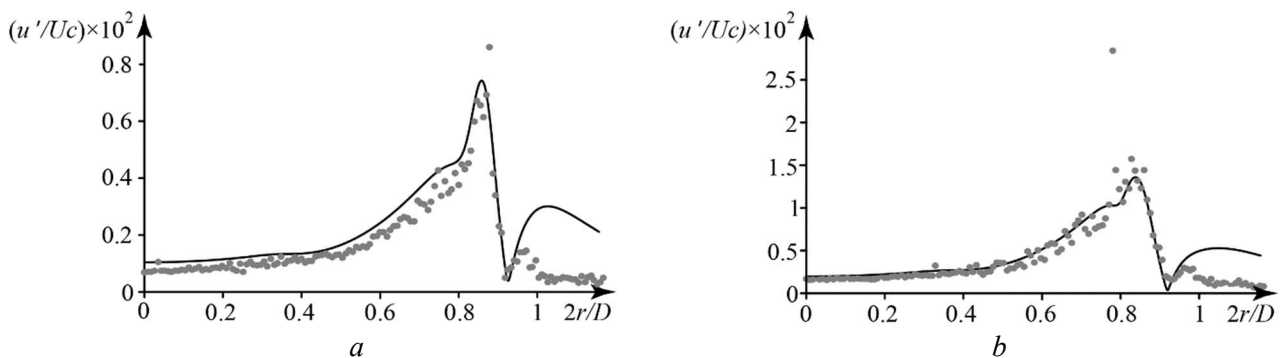


Рис. 5. Радиальные распределения теоретической осевой амплитуды $|F|$ растущих волн первой ветви (кривые) и флуктуаций скорости u'/U_c , полученных в экспериментах с большим кольцом (точки). Расчеты со средними профилями и аналогичные измерения для $x/D = 0.5$ (a) и 1 (b). В качестве примера здесь показаны результаты с $\Omega = 4$ Гц

3.2. Исследование немодального механизма роста возмущений

Визуализация поперечного сечения. Как было описано ранее, для моделирования возмущения, эволюционирующего согласно немодальному механизму роста, в затопленную струю помещались дефлекторы. Для изучения развития возмущений, вносимых дефлекторами с $\varepsilon = 0.1$ и $d_0 = 60$ мм ($d_0 = D/2$) (рис. 6, *a*), были проведены эксперименты по визуализации поперечных сечений струи лазерным ножом. Возмущения, вносимые дефлекторами на малых расстояниях, практически не деформируют поперечное сечение, но сечение изменяется по мере развития стационарного возмущения ниже по потоку, приобретая форму выходной кромки дефлекторов (рис. 6, *b*). «Лепестки» увеличиваются, вытягиваются в радиальном направлении от оси струи и образуют «шейку» – узкую область сечения струи, соединяющую «лепесток» с ядром струи. Вскоре после образования «шеек» наблюдается быстрый рост нестационарных пульсаций и переход к турбулентности на расстояниях $x/D \sim 3$ (для данного ε). Качественная схема развития таких возмущений представлена на рис. 6, *c*.

По фотографиям были измерены размеры «лепестков» для $n = 3, 4, 5$ в зависимости от продольной координаты x . Показано, что удлинение лепестков есть линейная функция x , поэтому возмущение радиальной скорости приблизительно постоянно, что согласуется с теоретическими расчетами стационарных оптимальных возмущений струи [22].

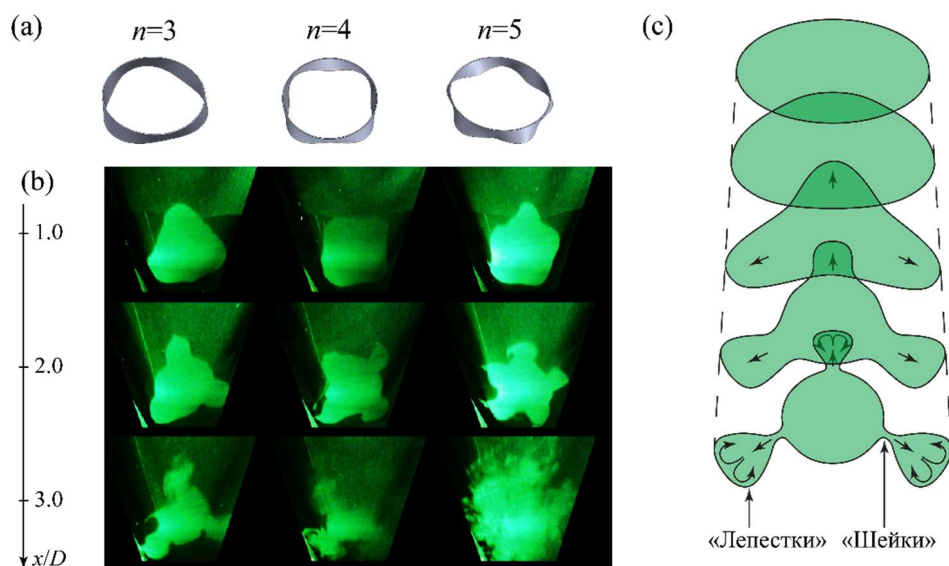


Рис. 6. 3D-модели дефлекторов с азимутальными числами $n = 3, 4, 5$ (*a*) и соответствующая им эволюция поперечных срезов струи вниз по течению (*b*); качественная схема такой эволюции (*c*)

PIV визуализация полей скорости. Для измерения поперечной компоненты возмущения скорости была использована система 2D PIV (Particle Image Velocimetry). Результаты измерений в поперечной плоскости показали [22], что параметры эволюции вносимого возмущения качественно соответствуют параметрам теоретически оптимальных возмущений, напоминающим «lift-up»-механизм в пограничных слоях, а образуемые в осредненном течении структуры напоминают полосчатые. Поперечное движение имеет валикообразный характер, перенося внешние – медленные – слои жидкости внутрь, а внутренние – быстрые – слои наружу. Это движение вызывает локальное увеличение возмущения осевой скорости, что является аналогом полосчатой структуры в пристеночных течениях. Пример полученного распределения поперечной компоненты возмущений скорости и продольной завихренности в поперечном срезе струи на расстоянии $x/D = 1$ для дефлектора $n = 4, \varepsilon = 0.1$ дан на рис. 7. Измерения в продольной плоскости показали, что максимальная по поперечному сечению продольная компонента возмущения скорости растет линейно, а поперечная изменяется слабо, что также соответствует представлениям об алгебраическом механизме роста возмущений.

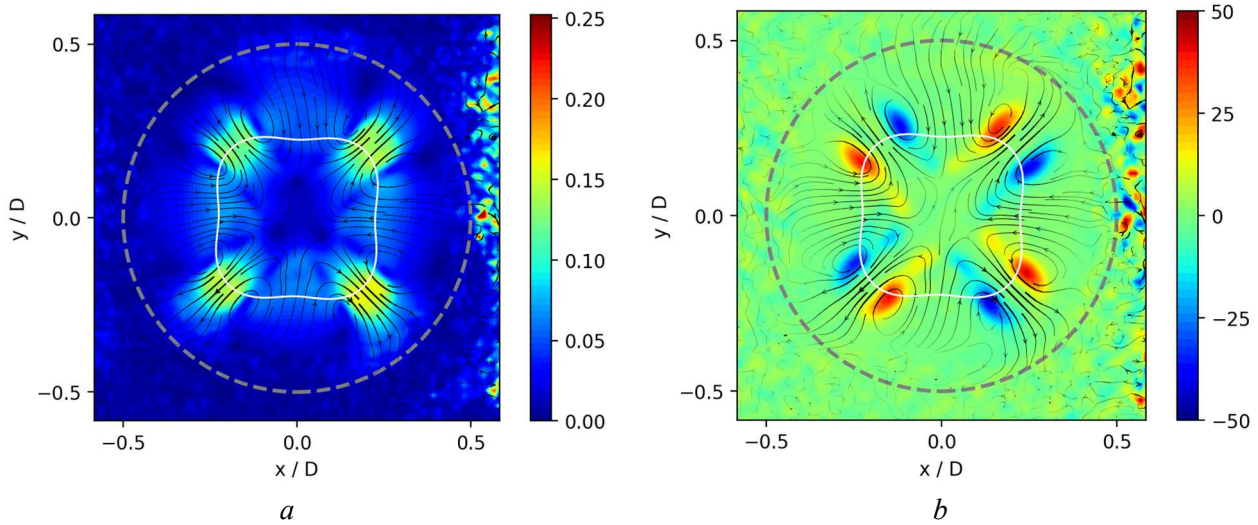


Рис. 7. Визуализация возмущения для дефлектора $n = 4, \varepsilon = 0.1$: модуль поперечной скорости a), продольная завихренность b)

4. Оптимальный рост пространственных возмущений в круглых струях

В данном разделе вкратце излагаются результаты работы [20], где был выполнен анализ оптимального роста пространственных возмущений в круглых затопленных струях.

Оптимальный рост энергии изучается для различных чисел Рейнольдса Re и частот ω . Различные профили скорости, предложенные Михалке [27], исследуются путем изменения толщины потери импульса сдвигового слоя δ , в то время как радиус струи R считается фиксированным (в качестве характерной длины).

Сначала линейризованная система уравнений Навье – Стокса дискретизируется при помощи метода коллокаций. Затем, для заданной частоты ω , азимутального волнового числа m и числа Рейнольдса Re находятся собственные значения и собственные моды $(\mathbf{q}_\nu, \alpha_\nu)$, где $\mathbf{q}_\nu = (u_\nu, v_\nu, w_\nu, p_\nu)$ вектор состояния системы, состоящий из скоростей по соответствующим осям координат и давления. При построении оптимального возмущения в качестве нормы используется кинетическая энергия возмущений:

$$E(u', v', w', x) = \frac{1}{4\pi T} \int_0^\infty \int_0^T \int_0^{2\pi} [(\Re u')^2 + (\Re v')^2 + (\Re w')^2] r d\theta dt dr,$$

где $T = 2\pi/\omega$, а \Re есть операция взятия действительной части функции.

Произвольное возмущение представляется в виде разложения по собственным модам:

$$\mathbf{q}^S(r, \theta, x, t) = \sum_{n=1}^N \gamma_n^S \mathbf{q}_n^S(r) \exp i(\alpha_n x + m\theta - \omega t)$$

Таким образом, задача поиска оптимального возмущения сводится к нахождению коэффициентов разложения $\gamma_n^S \in \mathbb{C}$, максимизирующих кинетическую энергию возмущения в фиксированной точке вниз по потоку x при значении начальной энергии, равном единице.

В случае стационарных возмущений отсутствуют растущие собственные моды, поэтому в конечном итоге энергия таких возмущений затухает вниз по течению. Такие возмущения характеризуются оптимальным ростом энергии как функции продольной координаты x . В определенном месте вниз по течению x_{max} это значение достигает своего максимума G_{max} , а затем затухает, хотя и не монотонно, в отличие от результата решения временной задачи. Известный закон масштабирования $G_{max} \propto Re^2$ и $x_{max} \propto Re$ подтверждается для стационарных возмущений.

С другой стороны, для нестационарных возмущений существует диапазон частот, в котором присутствует растущая мода. В этом случае оптимальные возмущения далеко вниз по потоку состоят только из растущей моды. Основным эффектом «немодальности» здесь является «энергетическая накачка» усиленной моды, поэтому возмущения характеризуются соотношением энергий G/E_m , т.е. отношением энергии произвольного возмущения к энергии растущей моды. Изучено влияние толщины потери импульса сдвигового слоя δ на оптимальные возмущения: увеличение δ базового течения «размывает» область, занимаемую оптимальным возмущением, хотя это не сильно влияет на значения прироста энергии, немного уменьшая максимальную энергию по мере увеличения δ . Обнаружены пространственные колебания в энергии стационарных оптимальных возмущений в струйных течениях. Исследование структуры спектра показало, что частота этих колебаний соответствует частотам двух наименее затухающих дискретных собственных мод.

3. Заключение

В работе дан краткий обзор избранных работ, выполненных в последние годы в Институте механики МГУ, по теме струйных течений и их устойчивости. Описано специальное формирующее устройство, которое позволило создавать затопленную струю с протяженным ламинарным участком (более 5 диаметров выходного сечения). Впервые экспериментально исследован линейный рост возмущений в струе воздуха ($Re = 5400$) при контролируемом введении возмущений. Были рассмотрены два различных механизма роста возмущений.

1. Экспериментально исследован модальный механизм линейного роста возмущений. Струя имеет две осесимметричные моды неустойчивости, которые изучались отдельно с использованием двух различных осциллирующих колец для внесения гармонических возмущений и различных методов измерения. Результаты сравнивались с расчетами собственных мод уравнения Рэлея в плоскопараллельном приближении. Они отлично согласуются с теоретическим анализом:

- (a) Длины волн обеих мод;
- (b) Радиальные распределения возмущений скорости первой моды.

2. Во второй части экспериментов был исследован немодальный механизм линейного роста возмущений. Стационарные возмущения в струе вносились в струю при помощи возбуждалось введением дефлекторов. Они вызывают валикообразное поперечное стационарное движение, которое качественно похоже на оптимальные возмущения профиля потока. Впервые экспериментально выявлен немодальный механизм роста возмущений в струйном течении, который является аналогом механизма «lift-up» в пристенных течениях. Подтверждены следующие характерные черты механизма роста «lift-up»:

- (a) Радиальная скорость практически постоянна;
- (b) Изменение осевой скорости вниз по потоку близко к линейному;
- (c) Поперечное движение имеет вид «валикообразного» движения, что вызывает перемещение быстро текущих частиц жидкости в медленную зону и наоборот, что является аналогом полосчатой структуры в пристенных течениях.

В теоретической работе [20] по исследованию алгебраического роста возмущений в затопленных струях с профилем скорости Михалке проведен анализ оптимального роста пространственных возмущений, исследовано влияние параметров профиля, числа Рейнольдса и частот возмущения на максимальный рост их кинетической энергии. Построены поля скорости возмущений.

Проведенные исследования прояснили многие аспекты теории устойчивости затопленных струй и показали направления дальнейших исследований, в том числе по управлению струйными течениями, как для максимально быстрого разрушения струй и их перемешивания, например, в камерах сгорания, так и для затягивания ламинарно-турбулентного перехода, например, для применения в «чистых зонах», где какое-либо перемешивание нежелательно.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00404.

Литература

1. Morris P. J. The spatial viscous instability of axisymmetric jets // *Journal of Fluid Mechanics*. 1976. Vol. 77. Pp. 511–526.
2. Shtern V., Hussain F. Effect of deceleration on jet instability // *Journal of Fluid Mechanics*. 2003. Vol. 480, pp. 283–309.
3. Муллыджанов Р. И., Яворский Н. И. Линейная гидродинамическая устойчивость дальнего поля затопленной ламинарной струи // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2018. Т. 11, № 3. С. 108–121.
4. Cohen J., Wygnanski I. The evolution of instabilities in the axisymmetric jet. Part 1. The linear growth of disturbances near the nozzle // *J. Fluid Mech.* 1987. Vol. 176. Pp. 191–219.
5. Petersen R. A., Samet M. M. On the preferred mode of jet instability // *J. Fluid Mech.* 1988. Vol. 194. Pp. 153–173.
6. Zayko J., Teplovodskii S., Chicherina A., Vedeneev V., Reshmin A. Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers // *Phys. Fluids*. 2018. Vol. 30. 043603.
7. Gareev L. R., Zayko J. S., Chicherina A. D., Trifonov V. V., Reshmin A. I., Vedeneev V. V. Experimental validation of inviscid linear stability theory applied to an axisymmetric jet // *J. Fluid Mech.* 2022. Vol. 934. A3.
8. Farrell B. F., Ioannou P. J. Optimal excitation of three-dimensional perturbations in viscous constant shear flow // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. 1993. Vol. 5. No. 6. Pp. 1390–1400.
9. Andersson P., Berggren M., Henningson D. S. Optimal disturbances and bypass transition in boundary layers // *Phys. Fluids*. 1999. Vol. 11. Pp. 134–150.
10. Tumin A., Reshotko E. Spatial theory of optimal disturbances in boundary layers // *Phys. Fluids*. 2001. Vol. 13. Pp. 2097–2104.
11. Luchini P. Reynolds-number-independent instability of the boundary layer over a flat surface: optimal perturbations // *J. Fluid Mech.* 2000. Vol. 404. Pp. 289–309.
12. Morkovin M. V. Bypass transition to turbulence and research desiderata // *NASA. Lewis Research Center Transition in Turbines*. 1985. Vol. 2386. Pp. 161–204.
13. Kendall J. M. Experimental study of disturbances produced in a pretransitional laminar boundary layer by weak free stream turbulence // *18th Fluid Dynamics and Plasmadynamics and Lasers Conference. AIAA Paper 85-1695*, 1985.
14. Косорыгин В. С., Поляков Н. Ф., Супрун Т. Т., Эпик Э. Я. Влияние турбулентности потока на структуру возмущений в ламинарном пограничном слое // *Пристеночные турбулентные течения*. г. Новосибирск: изд-во ИТФ СО АН СССР, 1984. С. 79–83.
15. Matsubara M., Alfredsson P. H. Disturbance growth in boundary layers subjected to free-stream turbulence // *J. Fluid Mech.* 2001. Vol. 430. Pp. 149–168.
16. Boiko A. V., Grek G. R., Dovgal A. V., Kozlov V. V. *The Origin of Turbulence in Near-Wall Flows*. Springer Berlin, Heidelberg, 2002. 268 p.
17. Boronin S. A., Healey J. J., Sazhin S. S. Non-modal stability of round viscous jets // *J. Fluid Mech.* 2013. Vol. 716. Pp. 96–119.
18. Jimenez-Gonzalez J. I., Brancher P., Martinez-Bazan C. Modal and nonmodal evolution of perturbations for parallel round jets // *Phys. Fluids*. 2015. Vol. 27. No. 4. 044105.
19. Wang C., Lesshafft L., Cavalieri A. V., Jordan P. The effect of streaks on the instability of jets // *J. Fluid Mech.* 2021. Vol. 910. A14.

20. Ashurov D. A. Optimal disturbances in round submerged jets // *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36. 104118.
21. Гареев Л. Р., Иванов О. О., Веденеев В. В., Ашуров Д. А. Влияние амплитуды вносимого стационарного возмущения на его немодальный рост в ламинарной затопленной струе // ПМТФ. 2024. Т. 65. № 1. С. 70–74.
22. Ivanov O. O., Ashurov D. A., Gareev L. R., Vedeneev V. V. Non-modal perturbation growth in a laminar jet: an experimental study // *J. Fluid Mech.* 2023. Vol. 963. A8.
23. Vedeneev V. V., Zayko J. On absolute instability of free jets // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. Vol. 1129. No. 012037.
24. Vedeneev V. V., Nikitin N. V. Absolute instability of plane incompressible jets // *J. Fluid Mech.* 2023. Vol. 962. A4.
25. Абдульманов К. Э., Никитин Н. В. Развитие возмущений в круглой затопленной струе с двумя модами неустойчивости // *Изв. РАН. МЖГ*. 2022. № 5. С. 25–40.
26. Спасова А. А., Зайко Ю. С. Разработка алгоритма формирования затопленной струи с заданными характеристиками профиля скорости // ПМТФ. 2023. Т. 64. №. 4. С. 67–75.
27. Michalke A. Survey on jet instability theory // *Progress in Aerospace Sciences*. 1984. Vol. 21. Pp. 159–199.

References

1. Morris P. J., The spatial viscous instability of axisymmetric jets, *Journal of Fluid Mechanics*, 1976, vol. 77, issue 3, pp. 511–526. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112076002231>
2. Shtern V., Hussain F., Effect of deceleration on jet instability, *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, vol. 480, pp. 283–309. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112002003646>
3. Mullyadzhyanov R. I., Yavorsky N. I., The far field of a submerged laminar jet: Linear hydrodynamic stability, *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*, 2018, vol. 11, issue 3, pp. 84–94. DOI: 10.18721/JPM.11310
4. Cohen J., Wagnanski I., The evolution of instabilities in the axisymmetric jet. Part 1. The linear growth of disturbances near the nozzle, *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, vol. 176, pp. 191–219. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112087000624>
5. Petersen R. A., Samet M. M., On the preferred mode of jet instability, *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, vol. 194, pp. 153–173. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112088002939>
6. Zayko J., Teplovodskii S., Chicherina A., Vedeneev V., Reshmin A., Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers, *Physics of Fluids*, 2018, vol. 30, p. 043603. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5021017>
7. Gareev L. R., Zayko J. S., Chicherina A. D., Trifonov V. V., Reshmin A. I., Vedeneev V. V., Experimental validation of inviscid linear stability theory applied to an axisymmetric jet, *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, vol. 934, p. A3. DOI: [doi:10.1017/jfm.2021.1022](https://doi.org/10.1017/jfm.2021.1022)
8. Farrell B. F., Ioannou P. J., Optimal excitation of three-dimensional perturbations in viscous constant shear flow, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1993, vol. 5, no. 6, pp. 1390–1400. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.858574>
9. Andersson P., Berggren M., Henningson D. S., Optimal disturbances and bypass transition in boundary layers, *Physics of Fluids*, 1999, vol. 11, pp. 134–150. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.869908>
10. Tumin A., Reshotko E., Spatial theory of optimal disturbances in boundary layers, *Physics of Fluids*, 2001, vol. 13, pp. 2097–2104. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1378070>
11. Luchini P., Reynolds-number-independent instability of the boundary layer over a flat surface: optimal perturbations, *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, vol. 404, pp. 289–309. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112099007259>

12. Morkovin M. V., Bypass transition to turbulence and research desiderata, *National Aeronautics and Space Administration, Lewis Research Center Transition in Turbines*, 1985, vol. 2386, pp. 161–204.
13. Kendall J. M., Experimental study of disturbances produced in a pretransitional laminar boundary layer by weak free stream turbulence, *18th Fluid Dynamics and Plasmadynamics and Lasers Conference*, 1985. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.1985-1695>
14. Kosorygin V. S., Polyakov N. F., Suprun T. T., Epik E. Ya., The influence of flow turbulence on the structure of disturbances in a laminar boundary layer, *Novosibirsk: Near-wall turbulent flows*, Institute of Physics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1984, pp. 79–83 [in Russian].
15. Matsubara M., Alfredsson P. H., Disturbance growth in boundary layers subjected to free-stream turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, vol. 430, pp. 149–168. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112000002810>
16. Boiko A. V., Grek G. R., Dovgal A. V., Kozlov V. V., *The Origin of Turbulence in Near-Wall Flows*. Heidelberg: Springer Berlin, 2002.
17. Boronin S. A., Healey J. J., Sazhin S. S., Non-modal stability of round viscous jets, *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, vol. 716, pp. 96–119. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2012.521>
18. Jimenez-Gonzalez J. I., Brancher P., Martinez-Bazan C., Modal and nonmodal evolution of perturbations for parallel round jets, *Physics of Fluids*, 2015, vol. 27, issue 4, p. 044105. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4916892>
19. Wang C., Lesshafft L., Cavalieri A. V., Jordan P., The effect of streaks on the instability of jets, *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, vol. 910, p. A14. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.963>
20. Ashurov D. A., Optimal disturbances in round submerged jets, *Physics of Fluids*, 2024, vol. 36, p. 104118. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0221966>
21. Gareev L. R., Ivanov O. O., Vedeneev V. V., Ashurov D. A., Effect of the Amplitude of a Stationary Perturbation on its Non-Modal Growth in a Laminar Submerged Jet, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2024, vol. 65, issue 1, pp. 61–65. <https://doi.org/10.1134/S0021894424010073>
22. Ivanov O. O., Ashurov D. A., Gareev L. R., Vedeneev V. V., Non-modal perturbation growth in a laminar jet: an experimental study, *Journal of Fluid Mechanics*, 2023, vol. 963, p. A8. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.286>
23. Vedeneev V. V., Zayko Ju. S., On absolute instability of free jets, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1129, p. 012037. DOI: [10.1088/1742-6596/1129/1/012037](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1129/1/012037)
24. Vedeneev V. V., Nikitin N. V., Absolute instability of plane incompressible jets, *Journal of Fluid Mechanics*, 2023, vol. 962, p. A4. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.163>
25. Abdul'manov K. E., Nikitin N. V., Development of Disturbances in a Circular Submerged Jet with Two Instability Modes, *Fluid Dynamics*, 2022, vol. 57, issue 5, pp. 571–586. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0015462822050093>
26. Spasova A. A., Zayko Ju. S., Development of AN Algorithm for Generating a Submerged Jet with Specified Velocity Profile Characteristics, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2023, vol. 64, issue. 4, pp. 610–617. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894423040065>
27. Michalke A., Survey on jet instability theory, *Progress in Aerospace Sciences*, 1984, vol. 21, pp. 159–199. DOI: [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(84\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0376-0421(84)90005-8)

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2024 г.