

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Пиманова Владимира Олеговича**  
**на тему: «Численное исследование локализованных турбулентных**  
**структур в трубах»**  
**по специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы»**

Диссертационная работа Пиманова В.О. посвящена выявлению и исследованию динамики турбулентных порывов в круглых трубах. Известно, что при малых значениях числа Рейнольдса течение в трубах является ламинарным, а при больших – турбулентным. При переходных значениях числа Рейнольдса происходит зарождение турбулентного режима, и ламинарный и турбулентный режимы могут сосуществовать. Если в этом диапазоне чисел Рейнольдса сильно возмущать поток на входе в трубу, возникают структуры, которые сносятся вниз по потоку со скоростью, близкой к средней скорости течения, практически не меняя свою протяженность. Такие структуры и называются турбулентными порывами. Сам по себе турбулентный порыв является интересной гидродинамической структурой, промежуточной на пути к турбулентности. Установлено, что турбулентный порыв нестабилен и, либо исчезает, либо подвергается делению за конечное время. Кроме того, Динамика самого порыва является сложной и обладает свойствами, присущими стохастическому процессу. Поэтому имеет смысл рассмотреть более простые структуры, в известном смысле аппроксимирующие порыв. Это предельные, сильно неустойчивые решения, лежащие в фазовом пространстве на подмногообразии, разделяющим области притяжения решений, отвечающих, соответственно, ламинарному и турбулентному режиму течения.

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений. Понимание динамики турбулентных порывов необходимо для корректного описания

ламинарно-турбулентного перехода в трубах. Исследование турбулентных порывов является логичным шагом на пути к пониманию более общих случаев турбулентных течений в трубах.

В диссертации проводится прямое численное моделирование: численно решается уравнение Навье-Стокса. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 92 наименования.

В **введении** обоснована актуальность темы исследования, описана структура диссертации, приводятся положения, выносимые на защиту, апробация результатов и личный вклад автора.

В **первой главе** диссертации рассматривается постановка задачи, приведен численный алгоритм решения и дана его реализация. Рассматривается движение вязкой несжимаемой жидкости в прямой трубе круглого сечения. Движение жидкости описывается уравнениями Навье-Стокса и неразрывности. На стенках трубы ставится условие прилипания. Для решения задачи используется конечно-разностный метод. Для реализации численного метода используется пакет программ, составленный ранее Н.В. Никитиным. В данной главе приведены результаты расчета в диапазоне чисел Рейнольдса  $1670 \leq Re \leq 2800$ . При  $Re \leq 2600$  в распределении скорости вдоль трубы появляется неоднородность, которая приобретает форму распространяющейся вдоль трубы цепочки из нескольких локализованных по пространству структур, разделенных участками ламинарного течения, которые хорошо согласуются с наблюдаемыми в эксперименте турбулентными порывами. При дальнейшем уменьшении числа Рейнольдса число локализованных структур уменьшается.

Во **второй главе** проведено исследование модельного порыва. Модельные порывы – это результат эволюции решения уравнений Навье-Стокса, лежащего в фазовом пространстве на сепаратрисе, отделяющей область притяжения решений, отвечающих ламинарному и турбулентному течению, соответственно. Хотя это решение неустойчиво относительно

инфinitезимальных возмущений, оно может быть получено численно, и численный метод его поиска был предложен ранее. Решение ищется с дополнительными ограничениями диаметральной симметричности и периодичности в угловом направлении. Модельный порыв имеет пространственно локализованную структуру и периодичен по времени. Несмотря на пространственную регулярность, временное поведение симметричного порыва является хаотичным. Решение, соответствующее предельному решению на сепаратрисе, получено при  $Re=2200$ . Описана итерационная процедура получения этого решения. Проведено сравнение модельного и турбулентного порывов. Подробно описаны свойства модельных порывов, а также механизмы, поддержания полос повышенной и пониженной скорости, а также формы пульсаций скорости и механизм их возбуждения в модельном порыве.

В главе 3 обсуждается механизм поддержания стационарных продольных вихрей, вызывающих полосчатую структуру в распределении продольной скорости. Получено и проанализировано периодическое решение базовых уравнений Навье-Стокса в виде бегущей волны вдоль потока (ближкое по свойствам к модельному порыву). Относительная простота поведения этого решения позволяет проанализировать ряд особенностей данного механизма. Установлено, что пульсации продольной скорости и пульсации завихренности являются согласованными и их взаимодействие поддерживает продольные вихри. Анализ решения в виде бегущей волны позволяет продемонстрировать работу механизма по поддержанию продольных вихрей, возникновение которых связывается с неустойчивостью неоднородного вдоль трубы поля скорости (неустойчивость Крейка-Лейбовича).

Глава 4 посвящена универсальности свойств модельного порыва присущих ряду других решений уравнений Навье-Стокса. В этой главе дано описание метода Ньютона-Крылова, позволяющего находить условно периодические решения (периодические по времени в некоторой подвижной

нестационарной системе отсчета). Найден, в частности, ряд решений уравнений Навье-Стокса типа бегущей волны, описывающих движение жидкости в круглой трубе и плоском канале. Продолжением решения, соответствующего модельному порыву, по числу Рейнольдса получены новые условно периодические по времени и локализованные по пространству решения, лежащие вне сепаратрисы в области притяжения турбулентного аттрактора. Продолжением по числу Рейнольдса решения типа бегущей волны, лежащего на сепаратрисе, получено новое семейство решений типа бегущей волны. Также получены и исследованы трехмерные бегущие волны для плоского канала. Найденные решения существенно отличаются друг от друга по форме и ряду других свойств. Тем не менее, все найденные решения, воспроизводят механизм поддержание колебаний, который аналогичен этому механизму для модельного порыва. В этом смысле модельный порыв обладает универсальными свойствами.

**В заключении** диссертации приводится обсуждение основных результатов работы.

Основным результатом диссертации я считаю выявление и описание нелинейного механизма поддержания продольных вихрей во всех исследованных решениях уравнений Навье-Стокса, вызывающих появление полосчатой структуры в распределении продольной скорости. Показано, что существование продольных вихрей обеспечивается нелинейным взаимодействием пульсаций продольной скорости и пульсаций продольной завихренности. Заслуживают упоминания также результаты об описании и исследовании модельного порыва, условно периодических решений и решений типа бегущих волн, а также об аналогичности механизма поддержания колебаний во всех исследованных решениях.

Результаты диссертации являются достоверными, так как при их получении использовались точные теоретические методы математики и механики сплошной среды, сложные численные методы. Все декларированные в диссертации результаты являются новыми.

Диссертация написана ясным и доступным языком, результаты изложены понятно. К возможным недостаткам работы я бы отнес следующие:

1. С моей точки зрения, неясно описано различие между турбулентным и модельном порывами в начале главы 2. В этом смысле, на рис. 2.1 следовало бы отметить где модельный, а где турбулентный порывы (об этом можно только догадываться).
2. Как понимать фразу «Пульсационная составляющая движения в этом решении (в модельном порыве. – А.И.) имеет форму бегущей волны? Что такое тогда пульсационная составляющая? В каком смысле можно определить среднюю и пульсационную скорости бегущей волны? (стр.54)

Эти недостатки связаны с особенностями стиля изложения и ни в коей мере не могут влиять на общую положительную оценку работы.

Диссертация В.О. Пиманова представляет собой законченное научное исследование. В диссертации получен целый ряд новых результатов. Результаты интересны и представляются важными, в том числе и для приложений: имея представление о механизме поддержания колебаний, исследованном в диссертации, можно предложить способы влиять на управление реальными турбулентными движениями с целью снижения или увеличения интенсивности колебаний. Более того, могут быть сделаны выводы о роли этого механизма для эффективности подобного управления.

Результаты диссертации могут найти применение в работе следующих организаций: НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Институте проблем механики РАН, в исследованиях, проводимых на механико-математическом и физическом факультетах МГУ имени М.В. Ломоносова.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. В частности, основные научные результаты диссертации опубликованы в трёх статьях в рецензируемых научных изданиях,

индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1 - 2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертация оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Название работы соответствует проведенному исследованию. Публикации по теме диссертации содержат описание примененной методики исследования и в полной мере отражают содержание работы.

Таким образом, соискатель Пиманов Владимир Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник отдела механики  
ФГБУН «Математический институт имени  
В.А. Стеклова Российской академии наук»  
ИЛЬЧЕВ Андрей Теймуразович



09.11.2018

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 984-81-41, e-mail: ilichev@mi-ras.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Адрес места работы:

119991, Россия, г. Москва, ул. Губкина, д. 8,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук»  
Тел.: +7 (495) 984-81-41; e-mail: steklov@mi-ras.ru

Подпись сотрудника ФГБУН «МИАН»

А.Т. Ильичева удостоверяю:

*Заведующий отделом кадров*



09 ноября 2018 г.