

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **Заметаева Владимира Борисовича “Около критические решения в теории отрыва и взаимодействия пограничного слоя с внешним потоком”**, представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Заметаева В.Б. посвящена развитию и применению асимптотических методов для построения численных решений и анализа двумерных и пространственных отрывных течений, в том числе при взаимодействии ламинарного пограничного слоя с внешним потоком. Работа охватывает широкий круг фундаментальных задач механики жидкости и газа, связанных с отрывом потока. Проблематика диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ (7. Транспортные и космические системы) и связана с разработкой критических технологий РФ (24. Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения). Диссертация выполнена в имеющей мировой авторитет научной школе ЦАГИ и во введении автор подробно указывает свой личный вклад.

Несомненно данная диссертационная работа является актуальной.

Научная новизна работы представляется вполне обоснованной. Оппонент согласен с заявленными в диссертации пунктами.

1. Получено решение, интерпретирующее течение вблизи точки зарождения отрыва при обтекании гладких трехмерных тел под углом атаки.

2. Детально исследовано влияние вихревой нити на предотрывный плоский пограничный слой.

3. Проанализирована топология предельных линий тока на поверхности тонкого тела с периодическими наплывами.

4. Разработан и протестирован новый численный метод решения задач с вязко-невязким взаимодействием.

5. Решена классическая задача о смешении двух потоков вблизи задней кромки плоской пластины с различными константами Бернулли и разными коэффициентами напряжения трения.

6. Обнаружен резонанс при возбуждении звуком собственных колебаний в локально непараллельном пограничном слое вблизи точки бифуркации решения по параметру.

7. Построена многопалубная структура решения вблизи особой звуковой точки в рамках теории тонкого ударного слоя.

Практическая значимость работы скорее выражена в ее направленности, чем в полученных конкретных прикладных результатах. Можно признать полезность полученных сведений при оценке корректности расчетов пограничных слоев промышленными пакетами программ. Также полученные теоретические результаты могут быть применены при постановке и анализе экспериментов в аэродинамических трубах для оценки отрывных режимов обтекания моделей. В тоже время доказана эффективность использования асимптотических методов изучения сложных течений вязкой жидкости и газа в предотрывном и отрывном состоянии. Особенно значительным выглядит объяснение физических механизмов перестройки пространственных решений вблизи бифуркационных режимов обтекания тел. Таким образом, фундаментальная сторона работы несомненна, в то время практическая применимость к новым авиационным разработкам требует дальнейших значительных усилий.

Апробация работы вполне приемлемая. Интересно отметить, что работа над диссертацией заняла более тридцати лет. Из десяти ВАКовских публикаций 8 сделаны в МЖГ. Немного странно, но нет статей в последние восемь лет.

Об инфраструктуре работы. Структура диссертации состоит из оглавления, введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 193 наименования (всего 224 стр. текста). **Во введении** дан обзор современного состояния исследований по теме диссертации, обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи, обозначены практическая значимость и научная новизна. Указаны методология и методы исследования, степень достоверности работы, приведены положения, выносимые на защиту. В **главе 1** рассматривается кромочный отрыв в трехмерных течениях. Анализируется обтекание тонкого конуса под углом атаки  $16^\circ$  при  $Re=15000$ , а также эллипсоида вращения под углом атаки  $30^\circ$ . **Глава 2** посвящена отрыву потока в рамках теории тонких тел. Исследуется обтекание тел различной геометрии с влиянием тонкой вихревой нити. Весьма интересны наплывы на теле вращения. В **главе 3** рассмотрены сложные задачи вязко-невязкого взаимодействия. Предложен оригинальный метод расчета, использующий схему Ньютона для единственной неизвестной функции – толщины вытеснения вязкого подслоя. Уверенно посчитаны огромные зоны отрыва при отклонении щитка на пластине. В **главе 4** рассмотрена восприимчивость к звуковым возмущениям локально непараллельного пограничного слоя. Получен резонанс возмущений вблизи точки бифуркации. В **главе 5** представлены результаты по невязкому взаимодействию в тонком ударном слое при высоких числах Маха. Описано обтекание слабоискривленного тупого торца кругового цилиндра. Заключение на двух страницах суммирует выводы по работе.

Представленная диссертационная работа, судя по перечисленным фрагментам, довольно эклектичная и разносторонняя, если не сказать разноплановая, причем первая глава заметно больше остальных глав по объему. Однако общее впечатление от ее прочтения сугубо положительное. Работа написана ясно, четко, не без некоторого изящества. Диссертация хороша, однако, “пища” для ее обсуждения имеется.

Несколько слов о концептуальной обоснованности работы и ее месте в спектре работ данного профиля. В первую очередь следует удостовериться в адекватности методической базы. В работе приводятся ее обоснования на основе сопоставления численных прогнозов с экспериментальными данными. Так, изучены предотрывные режимы обтекания вязкой несжимаемой жидкостью тонкого конуса (угол полураствора меньше  $7.5^\circ$ ) установленного под углом атаки  $4.5^\circ$ , удовлетворительно совпавшие количественно с экспериментальными данными, приведенными Чженом (1973)  $Re = 27000$ . Аналитические и численные прогнозы локального предотрывного и отрывного состояния несжимаемого пограничного слоя вблизи подветренной линии симметрии на вытянутом эллипсоиде вращения, установленном под углом атаки менее  $40^\circ$ , подтверждаются известными расчетами пограничных слоев (Себеси и др. 1980, 1981). Несколько странно, что нет сравнений с данными ЦАГИ.

К сожалению, акцент в работе на пограничный слой существенно сузил поле анализа отрывных течений. Давно уже решаются полные уравнения Навье-Стокса (DNS), а также осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (НС) с замыканием с помощью полуэмпирических моделей турбулентности. В последнее время активно развиваются и используются для расчета отрывных течений вихреразрешающие методы (LES, DES и их разновидности). Все указанные подходы реализованы в пакетных технологиях, включающих

средства визуализации и обработки баз данных пространственных полей. Следует подчеркнуть, что развиты оригинальные многоблочные методы расчета разномасштабных отрывных течений, в том числе со скачками уплотнения, на базе пересекающихся сеток и гибридных сеток с введением неструктурированных вставок в местах пересечения (см., например, монографии

- Исаева С.А., Баранова П.А., Усачова А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 316с

- Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Численное и физическое и моделирование / Под ред. С.А. Исаева. СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2016. 215 с).

Расчеты до- и сверхзвуковых течений с крупномасштабными вихрями стали рутинным делом. Поэтому следовало бы более четко указать нишу проповедуемого в данной диссертации подхода, связанного с развитием асимптотических методов.

Исследование структуры многомерных отрывных течений в диссертации Заметаева В.Б. хорошо сочетается с перспективной проблематикой в аэромеханике и теплофизике, связанной с управлением течением и теплообменом при организации в потоке крупномасштабных вихревых структур. Защищенная в 1977 году в Ленинградском механическом институте Беловым И.А. докторская диссертация акцентировала внимание на щитовых и дисковым вихревых генераторах и была признана ВАКом новым научным направлением в аэромеханике, а в 1983 году вышла авторская монография «Взаимодействие неравномерных потоков с преградами». В 1979 году опубликована монография Белова И.А., Исаева С.А., Коробкова В.А. «Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости», которая предвосхитила защищенную в 1991 году докторскую диссертацию Исаева С.А. «Численное моделирование крупномасштабных вихревых структур в гидродинамике внутренних и внешних течений с учетом эффектов турбулентности и сжимаемости». Монография «Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование)» вышла под редакцией А.В.Ермишина и С.А.Исаева в МГУ в 2003 году. Вихревая интенсификация теплообмена при обтекании структурированных лунками поверхностей представляет активно развивающуюся область теплофизики.

- Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб, Судостроение, 2005. 398с.

- Вихревые технологии для энергетики / А.И. Леонтьев, С.В. Алексеенко, Э.П. Волчков и др.; под общей редакцией академика А.И. Леонтьева. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 350с.

Замечания к работе Заметаева В.Б. возникли в ходе размышлений о прочитанном материале.

**1. В постановках задач по локальным объектам типа наплывов на телах вращения следовало бы оценить влияние  $Re$  и толщины ПС, высоты и формы наплыва. Не достаёт распределений давления, профилей скоростей. Интересно, какова интенсивность вторичного течения? Вообще хотелось бы видеть пространственные вихревые структуры.**

**2. Насколько эффективен разработанный метод? Не хватает сравнений.**

**3. Решенные задачи впечатляют. Кстати хорошее сравнение получено с решением уравнений НС по обтеканию наплыва. Однако не ясно, насколько физически**

оправданным получают численные прогнозы. Ведь реально там должно быть турбулентное течение. Также не ясно, каково влияние  $Re$  и геометрии щитка.

4. Что все-таки можно сказать о турбулентных течениях, насколько развитая методология может быть распространена на них?

5. Каковы пределы применимости развитой методологии по числам Рейнольдса, Маха, толщинам ПС?

Автореферат соответствует диссертации и достаточно полно отражает ее содержание.

Диссертационная работа является законченным научным исследованием, представляющим крупный вклад в раздел гидромеханики отрывных течений, а также в разработку и применение асимптотических методов. В диссертации изложены теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Содержание полностью соответствует паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. Выполненная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК России к докторским диссертациям, в том числе соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Заметаев В.Б. достоин присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Профессор кафедры механики  
Санкт-Петербургского государственного  
университета гражданской авиации,  
заведующий лабораторией фундаментальных  
исследований. д.ф.-м.н., проф.

06.05.2018

[isaev3612@yandex.ru](mailto:isaev3612@yandex.ru)

812-7710311

С.А.Исаев



Адрес организации: 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38

Подпись профессора Исаева С.А. заверяю



Профессор СПИТГА  
по науке и технике  
А.В. Губенко

