

О Т З Ы В

официального оппонента д.ф.-м.н. Демина Виталия Анатольевича на диссертацию **Заметаева Владимира Борисовича** «Около критические решения в теории отрыва и взаимодействия пограничного слоя с внешним потоком», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация **Заметаева Владимира Борисовича** посвящена теоретическому исследованию явления кромочного отрыва в сложных вязко- невязких течениях и имеет непосредственное отношение к аэродинамическим процессам на крыле. Известно, что спонтанная перестройка режима обтекания крыла должна приводить к резкому изменению сил и моментов, действующих на элементы конструкции, что может приводить к потере устойчивости движения летательного аппарата. Данная проблематика чрезвычайно сложна и характеризуется множеством нерешенных фундаментальных проблем, а также требует проведения дальнейших комплексных экспериментальных и теоретических исследований. С некоторой степенью условности можно утверждать, что наука о пограничном слое возникла из классических работ Прандтля. В нашей стране дальнейшее ее развитие было обусловлено объективным процессом индустриализации государства и, в частности, завоеванием лидирующих позиций в области самолетостроения и кораблестроения в до- и послевоенное время. Как это всегда бывает, с некоторым опережением данного процесса шла наука. В контексте обсуждения развития идей об обтекании тел нельзя не упомянуть глубокую и ставшую уже классической теорию акад. Л.Д. Ландау, касающуюся аэродинамического движения вблизи линии отрыва (*Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред // М.: Гостехиздат, 1944*). В этом смысле работы Владимира Борисовича Заметаева являются продолжением традиций, заложенных этим и многими другими отечественными учеными в рамках науки о пограничном слое, турбулентности и теории гидродинамической устойчивости.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем – 224 страницы; материал включает 80 различных иллюстраций и графиков. Список литературы содержит 193 наименования.

Во введении обоснована **актуальность** рассматриваемой тематики, формулируется **цель** работы и дается краткая характеристика диссертации. В том числе перечисляются основные положения, выносимые на защиту, обосновывается **достоверность** изложенных в диссертации результатов и указан личный вклад автора в ходе их получения.

В первой главе изучается ламинарное обтекание вязкой несжимаемой жидкостью тонкого тела с конической носовой частью, установленного под малым углом атаки при бесконечно больших значениях числа Рейнольдса. Также рассматривается случай симметричного тупого гладкого тела, установленного под большим углом атаки. Предметом исследования является возникновение линии отрыва вихревой пелены в окрестности подветренной линии симметрии. Показано, что ее начальная точка приближается к линии симметрии при определенных углах атаки. Пограничный слой вблизи линии симметрии анализируется около точки продольного нулевого напряжения трения. Это предельное течение возмущается углом атаки или пространственным развитием, либо одновременно и тем и другим. Выведены уравнения пограничного слоя без взаимодействия, допускающие как гладкие, так и разрывные решения. Сформулирована задача с взаимодействием между вязким подслоем и внешним потенциальным потоком. Приведены картины предельных линий тока для режимов обтекания без взаимодействия и с взаимодействием.

Во второй главе изучаются режимы обтекания тел с неблагоприятным градиентом давления для случаев осесимметричного внешнего потенциального течения. Тонкая вихревая нить с заданной циркуляцией, расположена вдоль свободной линии тока внешнего потока, набегающего на плоскую пластину. Двумерный пограничный слой несжимаемой жидкости на плоской пластине полагается подверженным действию неблагоприятного градиента давления в силу определенных внешних факторов. Указанное двумерное течение возмущается тонкой продольной вихревой нитью с постоянной циркуляцией и находится на малом расстоянии от поверхности. Изучается сингулярное развитие слабых вязких трехмерных возмущений, порождаемых тонким вихрем, вблизи точки нулевого трения двумерного предельного пограничного слоя. Установлено, что при возрастании циркуляции вихревой нити влияние на предотрывный двумерный пограничный слой носит радикальный характер в том смысле, что взаимодействие не позволяет продолжить решение вниз по потоку далее некоторой точки. Как отмечается в выводах по второй главе, этот факт означает кардинальную перестройку течения и, по-видимому, выброс завихренности за пределы пограничного слоя, что свидетельствует о зарождении вихревой пелены в данной точке.

Также рассматривается обтекание тонкого осесимметричного тела потоком вязкой несжимаемой жидкости в предельном режиме, а именно полагается, что потенциальное осесимметричное распределение давления на поверхности тела имеет зону роста. В результате продольное поверхностное напряжение трения в некотором сечении обращается в ноль. Проанализирован случай, в котором указанное предельное течение в осесиммет-

ричном пограничном слое возмущается малыми неровностями поверхности. Сформулирована задача о взаимодействии вязкого подслоя и внешнего потенциального потока.

В главе 3 предлагается новый численный метод для решения двумерных задач с взаимодействием. Сначала описывается собственно сам метод, основанный на специальном выборе одной неизвестной функции и решении неявной системы уравнений методом Ньютона. Обоснован выбор толщины вытеснения вязкого подслоя в качестве этой функции. Сформулирован способ вычисления матрицы Якоби на каждой итерации. Далее численно решена задача обтекания плоской пластины с отклоненным закрылком в рамках асимптотической теории взаимодействия. Проверена применимость метода для очень больших, не достижимых ранее замкнутых зон отрыва и вблизи точки бифуркации решения по параметру. Предложен способ прохождения точки бифуркации в сложных течениях. Численно решена классическая задача о смещении потоков несжимаемой жидкости с разными константами Бернулли и разными коэффициентами напряжения трения при стекании с задней кромки плоской пластины. Предложен метод учета дополнительного условия равенства давлений вниз по потоку от задней кромки пластины в нижнем и верхнем течениях жидкости.

Восприимчивость стационарного взаимодействующего пограничного слоя газа, обтекающего область отклонения закрылка за плоской пластиной, изучается в четвертой главе. В качестве источника возмущений рассматривается внешняя звуковая волна с фиксированной частотой. Предложено в качестве базового локально непараллельного стационарного потока, анализируемого на восприимчивость, принять решение близкое к точке бифуркации по углу отклонения закрылка. Рассматривается предбифуркационное стационарное решение задачи с взаимодействием, существующее не далее некоторого угла отклонения закрылка. Показано, что на другой ветви решений эта выбранная задача может содержать отрывные замкнутые зоны большого размера. Описываются режимы с докритическими и закритическими частотами внешней звуковой волны. Проанализировано обтекание выпуклого и вогнутого углов.

В главе 5 изучается невязкое взаимодействие в тонком ударном слое при больших числах Маха. Рассматривается гиперзвуковое обтекание совершенным невязким газом слабоискривленного торца круглого цилиндра в приближении тонкого ударного слоя. Изучаются режимы течения, в которых форма торца не является монотонной функцией радиуса, а содержит, например, центральное тело регулируемой высоты. Описан случай, в котором форма скачка уплотнения удовлетворяет нелинейному дифференциальному уравнению, которое допускает предельные решения, в определенном смысле подобные тем, что имели место для вязких течений. Сформулированы условия, при которых воз-

можно гладкое и негладкое продолжение решения через звуковую точку. Предложено взаимодействие специального типа между основной частью тонкого ударного слоя, скачком уплотнения и тонкой невязкой стружкой на поверхности тела, обусловленной действием разгонного градиента давления. Показано, что это взаимодействие усугубляет процесс разрушения течения.

Диссертация, несмотря на относительно небольшой объем, представляется тематически цельной: все изложение подчинено различным сторонам одной проблемы, а именно, теоретическому изучению предотрывных и отрывных течений вязкой несжимаемой жидкости в пограничных слоях вблизи существенно трехмерных тел. Построены асимптотические модели течений при бесконечных числах Рейнольдса. Исследованы присоединенные состояния пограничных слоев и их разрушение.

Диссертационная работа В.Б. Заметаева убедительно показывает, что техника, основанная на асимптотических методах, и в частности, методе сращиваемых асимптотических разложений, оказывается весьма эффективным инструментом при изучении сложных течений вязкой жидкости и газа в предотрывном и отрывном состояниях в ходе проведения фундаментальных поисковых исследований. Применяемая им методика дает зачастую более глубокое понимание природы процессов, ответственных за переход к турбулентности в аэродинамических течениях, нежели прямое численное моделирование. **Научные выводы и результаты** диссертации могут быть **использованы** при анализе как теоретических аспектов течений жидкости и газа, так и **при расчете промышленных изделий**.

Ввиду нетривиальности используемых методов и дискуссионности тематики исследования после прочтения диссертационной работы у оппонента возникли некоторые вопросы и замечания по ее содержанию.

Первый блок замечаний касается постановки задачи в главе 3. В частности, никак не комментируются физические причины неединственности длины отрыва в зависимости от угла α . Насколько реализуемо то или иное решение в природе? К сожалению, этот вопрос вообще никак не обсуждается в тексте диссертации. Почему отрывной вихрь называется пузырем? Для оппонента, как человека, занимающегося многофазными гидродинамическими системами, этот термин выглядит отчасти неестественно. Не является ли парадоксальной сама постановка задачи, которая рассматривается в §3 третьей главы о смещении пограничных слоев, стекающих с задней кромки крыла? При каких обстоятельствах в естественных условиях реализуется ситуация, когда на сколь угодно тонкой пластине, установленной параллельно набегающему потоку, имеют место заметно отличающиеся константы Бернулли над и под пластиной? В диссертации утверждается, что подобная ситуация может сложиться при смешении двух различных потоков или на боковой кромке

крыла малого удлинения под некоторым углом атаки. Но очевидно, что этот эффект становится все более заметным только при увеличении угла атаки, однако с другой стороны останутся ли при этом справедливыми те исходные предположения, которые были заложены изначально в асимптотическую модель? Насколько адекватны значения параметров, характеризующие асимметрию потока над и под пластиной, реальной ситуации с крылом небольшого удлинения ориентированного под малым углом атаки? Оценки на этот счет в тексте диссертации отсутствуют. В чем заключается физический смысл функции $g'(\eta)$ для решения в ближнем следе Гольдштейна (глава 3, §3), так что именно ее графики приводятся в тексте диссертации? Что кроме асимметрии между верхом и низом, выраженной количественно, демонстрируют зависимости $g'(\eta)$ для разных отношений λ_+/λ_- ?

Еще одно замечание касается четвертой главы. А именно, насколько уместно говорить о влиянии звуковой волны на вязкий пристеночный слой, если длина волны в рассматриваемом приближении получается много больше толщины пристеночного слоя, в результате чего система уравнений, приведенная на стр. 169, фактически описывает влияние вибраций на вязкую несжимаемую жидкость. Но звук – это явление, которое существенно завязано на сжимаемость среды, и специалисты в области вибрационной гидродинамики, дистанцируются от терминологии, характерной для акустики, т.к. картина движения, наблюдающаяся при воздействии вибраций на несжимаемую жидкость весьма специфична и обладает рядом характерных особенностей.

К сожалению, автором используется система цитирования, затрудняющая обращение к той или иной ссылке. Для того чтобы цитирование по алфавиту было удобным в использовании, необходимо, чтобы количество ссылок было относительно небольшим и в тексте приходится всегда четко упоминать автора и работу. В диссертациях количество ссылок, как правило, достаточно велико и может содержать до 300 – 400 наименований. Именно поэтому при оформлении списков литературы всегда используют сквозную нумерацию, а не алфавитный порядок. Делается это для однозначности идентификации каждой ссылки. В этом смысле использование автором диссертации системы цитирования по алфавиту оппонент считает крайне неудачным. В качестве примера можно привести абзац из первой главы (стр. 31):

“Данный параграф посвящен описанию двух работ автора [1987 б,в], с которых начался весь цикл исследований предельных трехмерных ламинарных течений, занявший порядка 30 лет. Исследования обтекания тонкого конуса, выполненные в 1984-1985 годах, явились, вероятно, первыми работами в мировой науке, обобщившими результаты Рубана [1981, 1982] на трехмерные случаи...”

В упомянутом абзаце сначала идет ссылка на собственные работы автора [1987 б, в]. Обходя некоторые неудобства, эти статьи все же идентифицируются в списке литературы. Однако далее, речь заходит о неких работах, выполненных в 1984-85 года после публикаций Рубана [1981, 1982]. И здесь оппонент так и не смог понять, какие работы имел в виду автор. Так как это первые, с точки зрения автора диссертации, *“работы в мировой науке, обобщившие результаты Рубана”*, то неплохо было бы на них четко сослаться. При чтении текста оппонент несколько раз сталкивался с указанной проблемой, которая, по его мнению, является следствием выбора непригодной при написании диссертаций системы цитирования. При сквозной нумерации, если в тексте стоит ссылка, это недвусмысленно означает, что автор хотел на что-то сослаться. Если никаких указаний на ссылку нет, значит, автор просто что-то утверждает от себя.

С одной стороны, диссертационную работу В.Б. Заметаева характеризуют математическая строгость и глубина изложения, т.е. не приходится сомневаться в том, что представленный в диссертации материал получен на переднем крае науки. С другой стороны, при ее чтении постоянно сталкиваешься с затруднениями, которые связаны с тем, что за каким-то невинным, на первый взгляд, предложением в тексте может стоять целая серия исследований, результаты которых требуют развернутых комментариев. Или неявно за четким, но весьма коротким обоснованием дальнейшего шага, стоит фундаментальная проблема, которую хотелось бы обозначить в тексте и обсудить, пусть даже как нерешенную в настоящее время. Часто автором опускаются промежуточные выкладки, которые просто необходимо было бы привести в диссертации, а они отсутствуют. Иными словами, выбранный стиль изложения привел к тому, диссертация оказалась написанной не для широкого круга читателей, а для узких, сложившихся специалистов в области аэродинамики, и стала уподобляться сжато-отчету о проделанной работе. Графический материал хотя и согласуется с логикой изложения, но весьма ограничен по объему и его оформление оставляет желать лучшего. С одной стороны, в тексте можно увидеть пронумерованные рисунки, а с другой – в каждой главе сплошь и рядом фигурируют рисунки с дублирующими номерами (повторение по количеству параграфов в главе). Позволю себе утверждать, что используемая нумерация не соответствует ни одному общепринятому стандарту. В оправдание подобной чехарды с нумерацией можно лишь указать, что недоразумений и противоречий с отсылкой к рисункам у рецензента, тем не менее, никогда не возникало, т.к. соответствующие графики и иллюстрации в тексте, как правило, располагаются в нужном месте и отыскиваются без труда.

Тем не менее, критические замечания, высказанные в отношении доступности изложения материала диссертации и оформления, совершенно не умаляют ее содержатель-

ной части и тех достижений, которыми заслуженно может гордиться автор. Одним из таких результатов, с точки зрения рецензента, является исследование течения вблизи плоской задней кромки крыла, за которой происходит смешение двух потоков несжимаемой жидкости. Структура полученного течения обобщает теорию Стюартсона (1969) и Месситера (1970), которая была построена для одинаковых потоков сверху и снизу пластины. Основное влияние задней кромки простирается на определенное расстояние, определяемое спецификой ограничений, а решение для области взаимодействия сращивается с решениями пограничного слоя вверх по потоку и со слоем смешения вниз по потоку. Эта задача была сформулирована Дэниэльсом (1977), но не была решена из-за значительных вычислительных сложностей. Предложенный автором диссертации эффективный численный метод позволил успешно преодолеть вычислительные проблемы.

Можно утверждать, что цели, поставленные в диссертации, достигнуты. Научные результаты, полученные автором, обладают новизной. Диссертационная работа В. Б. Заметаева “Около критические решения в теории отрыва и взаимодействия пограничного слоя с внешним потоком”, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, удовлетворяет всем квалификационным требованиям ВАК, включая п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена применением хорошо зарекомендовавших себя асимптотических методов (метод сращиваемых асимптотических разложений) при больших числах Рейнольдса, непротиворечивостью при сравнении с известными результатами расчетов трехмерных пограничных слоев и известными экспериментальными данными об особенностях разрушения присоединенных течений и глобальной перестройки всей картины обтекания тел.

Материалы диссертационной работы опубликованы в 32 печатных работах. В том числе, в ведущих рецензируемых зарубежных изданиях и отечественных журналах из списка ВАК опубликовано 10 статей. В указанных работах достаточно полно отражены основные результаты диссертации. Помимо всего прочего результаты исследований докладывались на многочисленных профильных международных и всероссийских конференциях.

Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию.

Можно утверждать, что по совокупности представленных результатов, кругу рассмотренных вопросов и глубине их проработки диссертация В.Б. Заметаева является **крупным научным достижением в области аэродинамики и теории гидродинамической устойчивости**. Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым

к докторским диссертациям, а ее автор, **Заметаев Владимир Борисович**, заслуживает присуждения ученой степени **доктора физико-математических наук** по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

заведующий кафедрой теоретической физики
Пермского государственного национального
исследовательского университета,
доктор физико-математических наук, доцент



Демин Виталий Анатольевич

4 мая 2018 г.

demin@psu.ru , рабочий тел.: 8 (342) 2396227, 8 (342) 2396208
адрес места работы: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15,
Пермский государственный национальный исследовательский
университет, кафедра теоретической физики

Я, Демин Виталий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации **Заметаева Владимира Борисовича** **“Около критические решения в теории отрыва и взаимодействия пограничного слоя с внешним потоком”**, и их дальнейшего оформления



В.А. Демин
секретарь совета