

## УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН Института  
теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Чристоановича СО РАН  
А. Н. Шиплюк  
28 » апреля 2018г.

OT313

Ведущей организации “Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.

Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук" на диссертацию Замстасева 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 старшего научного сотрудника ЦАГИ Заметаева Владимира Борисовича посвящена малоизученной проблеме, связанной с особенностями отрывных зон пространственных пограничных слоев.

**Актуальность** темы диссертации определяется распространностью отрывных течений в природе и технике. Прежде всего, отметим такую классическую проблему аэродинамики, как расчет характеристик профиля во всем диапазоне углов атаки, включая критические его значения. К сожалению, возникающие трудности описания течения в областях отрыва долгое время оставались непреодолимыми. Несколько работ, посвященных отрывному обтеканию, велико, число их быстро растет. На основе асимптотической теории самоиндуцированного отрыва, созданной В.Я. Нейландом, Стюартсоном и В.В. Сычевым, некоторые из них были преодолены. Последующие исследования Рубана, Стюартсона и Браун показали, что двумерные стационарные отрывные течения на моделях, установленных под углом атаки неединственны. Такие отрывы стали называть околограническими (кромочными). Существуют углы атаки, при которых уравнения пограничного слоя не имеют решений, когда можно ожидать схода вихревой пелены от гладкой поверхности. В настоящее время в достаточной мере изучен двумерный отрыв, чего нельзя сказать об отрыве при пространственном обтекании моделей.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и списка литературы. Содержание работы изложено на 224 страницах текста, включая 80 рисунков и графиков. Список литературы содержит 193 ссылки.

**Во введении** обосновывается актуальность работы, проведен подробный анализ работ по исследованиям пограничных слоев, начиная с исследований Прандтля. Обращено внимание на то, что при решении уравнений пограничного слоя при неблагоприятном градиенте давления может возникнуть непреодолимая особенность. Для ряда задач двумерного обтекания моделей в присутствии отрывных течений оказалось возможным применение асимптотической теории самоиндуцированного отрыва. Существуют условия, при которых решения вообще отсутствуют. Что касается отрывных течений трехмерного пограничного слоя, то они все еще оставались не исследованными. В результате, диссидентом сформулирована цель исследований, заключающаяся в создании методологии использования асимптотических методов для анализа около критических ламинарных отрывных течений в пограничных слоях при больших числах Рейнольдса, в том числе в пространственных пограничных слоях.

**В главе I** исследуется ламинарное обтекание вязкой несжимаемой жидкостью тонкого тела с конической носовой частью, установленного под малым углом атаки и симметричного тупого гладкого тела, установленного под большим углом атаки, при бесконечно больших числах Рейнольдса. Показано, что вблизи подветренной линии симметрии может начинаться линия отрыва вихревой пелены. Ее начальная точка приближается к линии симметрии при определенных углах атаки. Подробно проанализирован пограничный слой вблизи линии симметрии около точки продольного нулевого напряжения трения. Выведены уравнения пограничного слоя без взаимодействия, допускающие как гладкие решения, так и разрывные. 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. В первом параграфе исследуется взаимодействие тонкой вихревой нити с отрывной зоной пограничного слоя на плоской пластине, установленной под углом атаки. Изучено сингулярное развитие слабых вязких трехмерных возмущений, порождаемых тонким вихрем, вблизи точки нулевого трения двумерного предельного пограничного слоя. Исследуются режимы, при которых может образоваться вихревая пелена, начинающаяся на поверхности пластины.

В параграфе 2 рассмотрено обтекание тонкого осесимметричного тела потоком вязкой несжимаемой жидкости в предельном режиме, когда потенциальное осесимметричное распределение давления на поверхности тела имеет зону роста, приводящую к тому, что в некотором сечении продольное поверхностное напряжение трения обращается в ноль. В

частности, рассмотрен случай, в котором указанное предельное течение в осесимметричном пограничном слое возмущается малыми неровностями поверхности. Сформулирована задача о взаимодействии вязкого подслоя и внешнего потенциального потока.

Основной вывод этой главы заключается в том, что влияние слабой продольной вихревой нити на предотрывный двумерный пограничный слой носит радикальный характер. При возрастании циркуляции вихревой нити становится невозможным продолжить решение вниз по потоку далее некоторой точки. Такой факт может свидетельствовать о возможности зарождение вихревой пелены в данной точке. На основе асимптотической теории кромочного отрыва удается получить достаточно простые решения, которые описывают течения со сложной структурой линий поверхностного трения.

**Третья глава** посвящена численному исследованию сложных задач вязко-невязкого взаимодействия. В ней описывается новый эффективный численный метод решения двухмерных задач с взаимодействием и приведены примеры решений.

Сам метод, основанный на специальном выборе одной одномерной неизвестной функции и решении неявной системы уравнений методом Ньютона, сформулирован в первом параграфе.

В параграфе 2 численно решена задача обтекания плоской пластины с отклоненным закрылком в рамках асимптотической теории взаимодействия. Проверена применимость метода для очень больших замкнутых зон отрыва, не достижимых ранее, и вблизи точки бифуркации решения по параметру. Предложен способ прохождения точки бифуркации в сложных течениях.

В параграфе 3 численно решена классическая задача о смешении потоков несжимаемой жидкости, с разными константами Бернулли и разными коэффициентами напряжения трения, стекающих 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.

Здесь важно отметить, что предложенный метод использовался английскими учеными, которые, кроме того, проводили прямое численное моделирование и установили, что результаты двух методов полностью совпадают.

**В главе 4** изучается восприимчивость стационарного взаимодействующего пограничного слоя газа, обтекающего область отклонения закрылка за плоской пластины. В качестве источника возмущений рассматривается внешняя звуковая волна с фиксированной частотой. Предлагается в качестве базового локально непараллельного стационарного потока, подлежащего анализу на восприимчивость, принять решение близкое к точке бифуркации по углу отклонения закрылка. То есть рассматривается предбифуркационное стационарное решение задачи с взаимодействием, существующее не далее некоторого угла отклонения закрылка. На другой ветви решений эта

выбранная задача может содержать отрывные замкнутые зоны большого размера. Описываются режимы с докритическими и закритическими частотами внешней звуковой волны. Исследуются обтекания выпуклого и вогнутого углов. Установлено, что линейный отклик от звуковой волны, генерируемый внутри локально непараллельного взаимодействующего вязкого пограничного слоя, содержит волновое возмущение большой амплитуды. Полученное численно решение допускает резонансные частоты, при стремлении к которым амплитуда очень быстро нарастает.

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

**Достоверность полученных** результатов обусловлена применением хорошо зарекомендовавших себя асимптотических методов (метод сращиваемых асимптотических разложений) при больших числах Рейнольдса, удовлетворительным сравнением с известными результатами расчетов сложных трехмерных пограничных слоев и известными экспериментальными данными об особенностях разрушения присоединенных течений и глобальной перестройке всей картины обтекания тел.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в том, что полученные результаты и методы анализа могут использоваться при оценке корректности расчетов пограничных слоев промышленными пакетами программ. Методы изучения сложных течений вязкой жидкости и газа в предотрывном и отрывном состоянии предложенные в диссертации могут быть использованы в смежных поисковых исследованиях. Полученные теоретические результаты будут полезны при постановке и анализе соответствующих экспериментов в аэродинамических трубах, а также при анализе результатов прямого численного моделирования.

Результаты по теме диссертации опубликованы в 32 работах, в том числе более 10 публикаций из списка ВАК. Результаты работы доложены на многочисленных российских и международных конференциях и семинарах.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

К числу недостатков можно отнести следующее:

1. Не смотря на то, что результаты, представленные на рисунках, обсуждаются в диссертации, не на все из них даются ссылки. Так

отсутствуют ссылки на фигуры 5-9 (§2 главы 1) и фиг.4 (§2 главы III), что затрудняет восприятие результатов.

2. При обсуждении фиг. 2 (§2 главы IV, стр. 175) остается неясным, каким образом тестовый расчет демонстрирует чувствительность расчетного метода.

3. Трудно согласиться с фразой “возмущение стоит на одном месте и при резонансе дает, возможно, абсолютную неустойчивость” (Выводы главы 4). Об абсолютной неустойчивости можно говорить только в потоках независящих хотя бы от одной координаты (см., например, Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Физическая кинетика). В случае, рассмотренном диссертантом, стационарное течение зависит от всех координат. Поэтому здесь можно говорить только о временной неустойчивости и резонансных явлениях, что, по-видимому, и имело место в рассмотренной автором задаче. Было бы полезно провести расчеты при частотах превышающих резонансную (собственную частоту) и показать, что в этом случае амплитуда вынужденных колебаний убывает с увеличением частоты.

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. В ней получен целый ряд важных результатов. Разработана методология исследования асимптотическими методами предотрывных и отрывных состояний ламинарных течений жидкости и газа около трехмерных тел при больших числах Рейнольдса. Показано, что гладкие решения уравнений пространственного пограничного слоя стремятся к особому критическому решению (сингулярному пределу) при нарастании соответствующих характерных параметров задачи. Изучены критические состояния вязких отрывных пространственных течений жидкости и газа в пограничных слоях с вязко-невязким взаимодействием и их глобальная перестройка при превышении некоторого предельного значения соответствующего параметра задачи. Построены топологические картины предельных линий тока на поверхности рассмотренных тел в пространственных течениях, которые имеют сложную структуру.

Таким образом, можно считать, что исследования в диссертационной работе открывают новое научное направление, связанное с изучением отрывных течений при пространственном обтекании тел.

Результаты исследований будут полезны широкому кругу ученых разных организаций, таких как ИТПМ СО РАН, ИПМ РАН, ЦАГИ, ВЦ РАН, Институт механики МГУ, ЦИАМ, МГТУ им. Баумана.

Считаем, что диссертационная работа «Около критические решения в теории отрыва и взаимодействия пограничного слоя с внешним потоком» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор Заметаев Владимир Борисович заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Отзыв утвержден на семинаре «Теоретическая и прикладная механика»  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института  
теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского  
отделения Российской академии наук 13 апреля 2018 года, протокол № 43.

Зам. председатель семинара

Академик РАН



В. М. Фомин

Тел. +7(383)330 85 34

E-mail: fomin@itam.nsc.ru

Главный научный сотрудник лаборатории  
волновых процессов в сверхзвуковых

Д.Ф.-м.н., профессор



С. А. Гапонов

Тел. +7(383) 330 12 28

E-mail: gaponov@itam.nsc.ru

« 25 » апреля 2018г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского  
отделения Российской академии наук:

Почтовый адрес:

630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,

Телефон: (383) 330-42-68,

Факс: (383) 330-72-68,

Эл. почта: [admin@itam.nsc.ru](mailto:admin@itam.nsc.ru),

Сайт: <http://itam.nsc.ru>