

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Перминова Анатолия Викторовича
«ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ РЕОЛОГИЕЙ ВО
ВНЕШНИХ СИЛОВЫХ ПОЛЯХ»,
представленной на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа посвящена теоретическому и численному исследованию влияния внешних силовых полей на движение жидкостей с особыми свойствами.

В технологических процессах используется множество жидкостей с различной реологией, в частности, вязкопластических и нелинейно-вязких жидкостей. К таким жидкостям относятся нефть и нефтепродукты, растворы и расплавы полимеров, суспензии угольного топлива, лаки, краски, зубная паста, некоторые жидкие пищевые продукты. При этом технологические процессы, в которых имеют место обтекание нелинейно-вязкими жидкостями твердых тел или пленочные течения, часто происходят при наличии вибраций. Вибрации существенно влияют на гидродинамику и тепломассоперенос в неньютоновских жидкостях, поэтому их влияние необходимо учитывать. Теоретические основы гидродинамики и тепломассообмена в таких жидкостях при наличии вибраций находятся еще в стадии разработки, поэтому актуальны. При исследовании влияния нестационарных силовых полей на нелинейно-вязкие среды также актуальными становятся задачи, связанные с исследованием устойчивости стационарных состояний. Представляют интерес для исследования и формирующиеся после потери устойчивости стационарного состояния течения. К жидкостям с особыми свойствами можно отнести проводящие жидкости и бинарные смеси, хотя реология этих сред определяется ньютоновским законом. Исследование течений этих жидкостей актуально, например, в связи с применениями в полупроводниковой микроэлектронике для получения монокристаллов.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность задач, рассматриваемых в диссертации, формулируются цели исследования, отмечается новизна результатов, их теоретическая и практическая значимость.

В первой главе приводится краткая характеристика структурно-механических свойств, рассматриваемых жидких систем, их реологические модели и обзор литературы.

Во второй главе исследуются изотермические пульсационные и осредненные течения обобщенных ньютоновских жидкостей при обтекании твердых тел. В параграфе 2.1 обосновывается термин «обобщенные ньютоновские жидкости» и выписываются основные реологические уравнения и уравнения движения таких жидкостей. В параграфе 2.2 изучались

пульсационные и осредненные течения дилатантной несжимаемой жидкости в вязком пограничном слое вблизи твердой поверхности. Рассматривалась плоская задача. С помощью метода многих масштабов, в пункте 2.2.1 получены безразмерные уравнения движения и граничные условия, определяющие течение дилатантной жидкости в пограничном слое. Для изучения влияния неньютоновских свойств на пульсационное течение в пограничном слое в пункте 2.2.2 рассмотрена модельная задача о пульсационном течении дилатантной жидкости между двумя твердыми пластинами. Показано, что при увеличении показателя неньютоновости толщина вязкого пограничного слоя уменьшается, и в нем происходит заметный рост амплитуды пульсаций скорости. В пункте 2.2.3 проведен расчет осредненного течения дилатантной жидкости в вязком пограничном слое в случае её поперечных высокочастотных колебаний около бесконечного твердого цилиндра. В параграфе 2.3 изучено обтекание поперечным потоком вязкопластичной жидкости твердого бесконечного цилиндра. Показано, что с увеличением расстояния от поверхности цилиндра происходит уменьшение скорости сдвига, что приводит к уменьшению вязких напряжений, которые в некоторых областях потока становятся меньше порогового значения для данной вязкопластичной жидкости. Такие области течения называются квазитвердыми или жесткими зонами.

В третьей главе рассмотрен наклонный слой вязкопластичной жидкости, ограниченный сверху свободной поверхностью, а снизу – твердой плоскостью, которая может совершать касательные вибрации. В параграфе 3.1 исследуется стационарное течение слоя вязкопластичной жидкости в поле тяжести, описываемой реологическими моделями Шведова-Бингама и Уильямсона. В параграфе 3.2 изучалось влияние симметричных и несимметричных вибраций на течение слоя вязкопластичной жидкости по наклонной твердой плоскости в поле тяжести. Показано, что на плоскости параметров угол наклона слоя и период колебаний при всех типах вибраций можно выделить области, соответствующие жесткому состоянию слоя на протяжении всего периода вибраций. Основные расчеты проводились для значений параметров, при которых в слое в течение периода вибраций существуют одновременно жидкая и жесткая фазы. В параграфе 3.3 рассматривается устойчивость стационарного плоскопараллельного течения слоя жидкости Уильямсона по наклонной твердой поверхности в поле тяжести в отсутствие вибраций. Показано, что для жидкости Уильямсона, как и для ньютоновской жидкости, наибольшую опасность представляют длинноволновые возмущения свободной поверхности жидкости.

В четвертой главе для обобщенных ньютоновских жидкостей с умеренными значениями эффективной вязкости, находящихся в поле мало-амплитудных высокочастотных неакустических вибраций, получены осредненные уравнения термовибрационной конвекции, которые отличаются от аналогичных уравнений для ньютоновской жидкости только видом

вязкого слагаемого. Приведены выражения для осредненных тензоров вязких напряжений реологических моделей Освальда-де Вилия, Уильямсона и Шведова-Бингама. Показано, что квазитвердое (жесткое) состояние, являющееся частным случаем квазиравновесия, возможно для всех жидкостей из рассматриваемого класса, кроме вязкопластичной, только тогда, когда векторы, определяющие направление вибраций, поля тяжести и равновесного градиента температуры направлены вдоль одной прямой. Исследована устойчивость жестких состояний слоя вязкопластичной жидкости, при этом использовался вязкопластичный предел реологической модели Уильямсона. Показано, что жесткое состояние может стать неустойчивым при ориентациях слоя, близких к вертикали или горизонтали.

В пятой главе изучается устойчивость стационарного конвективного течения жидкости Уильямсона в вертикальном бесконечном слое, ограниченном твердыми идеально-теплопроводными плоскостями. На границах слоя поддерживаются постоянные разные температуры и выполняются условия прилипания. Для расчета основного стационарного течения и анализа его устойчивости использовались уравнения свободной тепловой конвекции в приближении Буссинеска, где вязкое слагаемое определялось реологическим уравнением Уильямсона. Результаты решения задачи устойчивости для псевдопластической жидкости качественно совпадают с результатами более ранних работ других авторов, однако, существенно дополняют их, описывая более подробно механизмы неустойчивости и влияние на устойчивость течения различных параметров. Показано, что для жидкости Уильямсона, как и для ньютоновской жидкости, имеются две моды неустойчивости: гидродинамическая монотонная и тепловая колебательная. Монотонная мода существует при всех значениях числа Прандтля. Колебательная мода при малых значениях числа Прандтля исчезает. Приведены карты устойчивости течения вязкопластичной жидкости для различных значений динамического предела текучести. Проведено прямое численное моделирование пространственно-периодических структур, возникающих в вертикальном слое псевдопластичной жидкости после потери устойчивости стационарного плоскопараллельного течения. Показано, что после потери устойчивости основного течения на границе встречных потоков генерируется периодическая цепочка вихрей.

В шестой главе рассматривается тепло- и массоперенос в жидких металлах или расплавах, который описывается уравнениями тепловой конвекции в приближении Буссинеска с учетом действия на течение электромагнитной силы и наличия джоулева нагрева среды за счет индукционных токов. В параграфе 6.1 решается задача об адвективном течении слабопроводящей жидкости в бесконечном горизонтальном канале прямоугольного сечения, которое вызвано продольным градиентом температуры и находится под влиянием внешнего стационарного магнитного поля, ориентированного в плоскости сечения канала. Установлено,

что в нижней части канала жидкость движется в направлении приложенного градиента температуры, а в верхней части – в противоположную сторону. Интенсивность течения и распределение скорости в поперечном сечении зависят от величины и направления магнитного поля. В сильном вертикальном магнитном поле конвективное течение сосредоточено возле углов канала, так, что вместо двух противоположно направленных потоков имеются четыре горизонтальных струи. Проанализировано влияние магнитного поля на устойчивость течения для малых чисел Прандтля, при которых наиболее опасными являются монотонные возмущения с конечной длиной волны. Магнитное поле в большинстве случаев подавляет эти возмущения, причем стабилизирующее действие вертикального магнитного поля более сильное, чем горизонтального. В параграфе 6.2 для осесимметричной геометрии сформулирована математическая модель конвекции парамагнитного металлического расплава в переменном неоднородном магнитном поле, учитывающая как медленные процессы, определяемые осредненными величинами, так и быстрые пульсационные явления, вызванные взаимодействием переменного неоднородного магнитного поля и индукционных токов в расплаве.

Седьмая глава посвящена исследованию устойчивости стационарного плоскопараллельного адвективного течения двухкомпонентной смеси в плоском горизонтальном слое, ограниченном сверху и снизу идеально-теплопроводными твердыми границами. Показано, что при нормальном эффекте Соре термодиффузия ведет к накоплению легкой компоненты смеси в той части слоя, где выше температура. Плотность смеси в области высокой температуры понижается вследствие теплового расширения и обогащения легкой компонентой, что приводит к увеличению скорости адвективного движения. При аномальном эффекте Соре термодиффузия ведет к накоплению легкой компоненты смеси в той области слоя, где температура ниже, происходит торможение потока. Исследована устойчивость стационарного адвективного течения для трех смесей: жидкометаллического расплава; газовой смеси; раствора соли в воде. Результаты численных расчетов представлены в виде карт устойчивости.

В диссертации получены ряд **новых результатов**. В частности:

- исследованы течения вязкопластичных жидкостей при касательных симметричных и несимметричных вибрациях наклонной твердой поверхности; обнаружен эффект немонотонной зависимости среднего расхода жидкости от периода и амплитуды вибраций; показана принципиальная возможность движения вязкопластика против поля тяжести;
- изучена линейная устойчивость стационарного течения псевдо- и вязкопластичных жидкостей по наклонной твердой поверхности;

- решена задача линейной устойчивости жесткого состояния бесконечного наклонного слоя обобщенной ньютоновской и вязкопластичной жидкостей;
- получено решение линейной задачи устойчивости плоскопараллельного конвективного течения псевдо- и вязкопластичной жидкостей в бесконечном вертикальном слое с границами, нагретыми до разных температур; рассчитаны надкритические режимы конвекции;
- решена задача о стационарном адвективном течении проводящей жидкости в бесконечном горизонтальном канале прямоугольного сечения при наличии постоянного однородного магнитного поля; решена задача линейной устойчивости такого течения; обнаружен эффект дестабилизации адвективного течения горизонтальным поперечным к оси канала магнитным полем;
- создана математическая модель, описывающая осредненный и пульсационный тепломассоперенос и распределение магнитного поля в проводящем парамагнитном расплаве в магнитном поле индукционной печи; предложено обоснование условия оптимального индукционного разогрева парамагнитного образца;
- решена задача линейной устойчивости адвективного течения бинарной смеси в плоском горизонтальном слое с твердыми идеально теплопроводными границами, с учетом эффекта термодиффузии.

По содержанию работы можно сделать следующие замечания.

1. На стр. 103 говорится, что h (расстояние между пластинами) безразмерная величина, из текста непонятно в единицах какой длины она измеряется.
2. Во втором абзаце стр. 105 непонятно откуда берется выражение для q и как оно разлагается в ряд Тейлора.
3. На стр. 106 вводится коэффициент $K(n)$ и для него построен график, но ни коэффициент ни график никак не комментируются.
4. На рис. 3.1 не правильно изображена система координат. Она привязана к слою жидкости, а следовало привязать ее к твердой подложке.
5. Автор несколько раз употребляет словосочетание «абсолютно устойчиво» безотносительно к типу возмущений (стр. 185, 206 и т.д.). Считаю это неправильным – всегда найдутся возмущения (не обязательно малые) по отношению к которым равновесие или движение будет неустойчивым.
6. На стр. 206 говорится, что абсолютно устойчивое состояние вязкопластичной жидкости достигается при $D < 0,25$, а на стр. 217 то же утверждение делается для $D > 0,25$.

7. На стр. 250 без каких либо обоснований предполагается, что плотность свободного заряда в жидкости пренебрежимо малая величина.
8. В диссертации рассмотрен достаточно широкий спектр задач, но нигде нет количественного сравнения с результатами экспериментов других авторов. Этого нет даже в параграфе 6.2, который посвящен исследованию тепломассопереноса в реальной индукционной печи. Почему?

Несмотря на сделанные замечания, работе следует дать положительный отзыв. Результаты, полученные в диссертации, имеют большое значение для развития знаний в области гидродинамики и тепломассообмена нелинейно-вязких жидкостей при воздействии на них вибрационных полей и воздействии электромагнитных полей на проводящие жидкости. Кроме того, эти результаты могут иметь практическое значение, в частности, будут полезны при моделировании технологических процессов в пищевой и химической промышленности.

Полученные в работе результаты можно считать **достоверными**, так как они согласуются с результатами подобных работ других авторов и с предельными случаями ньютоновских жидкостей.

Диссертационное исследование является законченным, его результаты достаточно широко освещены в научных публикациях, апробированы на ряде конференций различного уровня, часть работ, выполненных в рамках диссертационного исследования, поддержана грантами.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Перминова А.В. соответствует требованиям ВАК РФ п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, и автор заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Оппонент: Саранин Владимир Александрович, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики и дидактики физики Глазовского государственного педагогического института
427621, г. Глазов, ул. Первомайская, 25, тел. (8-34141) 5-58-57, e-mail: ggpi@ggpi.org,
saranin@ggpi.org.

Подпись

В.А. Саранин

