

О Т З Ы В

официального оппонента доктора физико-математических наук, доцента Яковенко Сергея Николаевича на диссертационную работу **Ковтуненко Павла Викторовича** «**Распространение длинноволновых возмущений в пространственно-неоднородном движении жидкости**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация П.В. Ковтуненко посвящена развитию математического аппарата теории мелкой воды и построению новых длинноволновых моделей, которые применяются к ряду течений типа тонких сдвиговых слоев несжимаемой жидкости.

Актуальность темы работы связана с отсутствием точных решений для большинства задач аэрогидродинамики, за исключением единичных примеров задач простой геометрии в ограниченном диапазоне параметров (например, ламинарное течение в плоском канале). Также, прямое численное моделирование уравнений Навье–Стокса применимо лишь для ограниченного класса задач при относительно небольших числах Рейнольдса. Для описания реальных течений жидкости и газа в подавляющем большинстве случаев приходится применять приближенные модели методов RANS и LES, основанные на эмпирической информации и требующие привлечения существенных ресурсов вычислительных технологий, или методы и средства физических экспериментов, имеющие ряд ограничений по точности измерений и условиям их проведения. Таким образом, имеет смысл развивать включающие минимум эмпирической информации модели, основанные на аналитических исследованиях упрощенных систем уравнений для определенных классов движений жидкости и газа. Такие подходы могли бы помочь в оперативном получении качественных оценок и количественных данных для распределений термогидродинамических полей и их интегральных характеристик. Следует признать, что в настоящее время наблюдается существенный разрыв между возможностями этих методов и полуэмпирических моделей механики жидкости и газа. Решение актуальной задачи по развитию математического аппарата теории мелкой воды и построению новых моделей, которые могли бы успешно дополнить долгостоящие физический и численный эксперименты, является целью диссертации П.В. Ковтуненко.

Работа включает введение, 3 главы, заключение, список литературы.

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулированы цели и основные положения, с указанием новизны, теоретической и практической значимости.

В первой главе записана интегродифференциальная модель для пространственно-неоднородных течений в канале со свободной поверхностью, построены классы решений в виде простых и бегущих волн, сформулированы критерии устойчивости течений и осредненные модели движения в рамках газодинамической аналогии и «многослойной» аппроксимации, выполнены тестовые расчеты для задачи о распаде разрыва.

Во второй главе сформулированы уравнения движения тонкого слоя вязкой жидкости вдоль наклонной плоскости под действием силы тяжести, показана возможность построения решений со слабым разрывом и получено уравнение для его амплитуды, допускающее нелинейный рост и опрокидывание волн, упрощены уравнения исходной модели на основе многослойной аппроксимации, получены численные результаты при постоянной вязкости и стратификации по вязкости.

В третьей главе применительно к течению в ячейке Хеле–Шоу исследована система двумерных нестационарных уравнений для описания слоя смешения двух

потоков флюидов с различными величинами вязкости и скорости, сформулирована одномерная осредненная модель для этого случая, проведены расчеты по развитию слоя смешения и определению его поперечного размера по полной и упрощенной моделям.

В заключении перечислены основные результаты диссертации.

Научная новизна работы заключается в получении и изучении новых классов точных решений на основе методов теоретических исследований уравнений с операторными коэффициентами, формулировке новых длинноволновых моделей теории мелкой воды, упрощающих исходные уравнения путем «многослойной» аппроксимации и позволяющих получить быстрые качественные оценки основных характеристик рассматриваемых течений типа тонких сдвиговых слоев жидкости и газа, в том числе и с переменной вязкостью.

Практическая значимость исследований состоит в возможности применения сформулированных математических моделей и проведения эффективных расчетов по этим моделям для описания сложных физических процессов, включающих тонкие сдвиговые слои, например, в современных технологиях нефтегазодобычи.

Из достоинств работы стоит отметить высокий научный уровень и лаконичный стиль изложения материала, позволивший включить значительный объем результатов теоретического анализа и численного моделирования.

По работе есть следующие замечания и вопросы:

1. В обзоре работ [1-78] (с. 5-9) раскрывается состояние науки в рассматриваемой области, но не указаны белые пятна предшествующих исследований. Что не сделано, где нужно было приложить усилия, по мнению автора? Это следовало обозначить перед формулировкой целей работы, чтобы лучше было видно элементы ее новизны.

2. Утверждение (с. 14) «корректность результатов численного моделирования подтверждается сравнением с аналитическими решениями и верификацией алгоритмов на элементарных тестовых задачах» не проиллюстрировано на приведенных рисунках. В частности, помимо результатов автора не приведено точных решений, данных физических экспериментов, расчетов других авторов (например, из полных уравнений Навье–Стокса), которые могли бы показать работоспособность сформулированных автором моделей.

3. Чем обусловлен выбор числа точек сетки $N = 400$ (с. 45, 65, 79)? Наблюдается ли сходимость к независимому от сетки решению, при каких значениях N ? Возможно, требуется сгущение сетки в местах с большими градиентами искомых величин. Возникает тот же вопрос выбора числа слоев $M = 50$ и независимости решения от M (с. 46, 65, 79), а также для $N = 200$ и 5000 (с. 93, 95)? Какое число N в расчете по полной модели (3.2)?

4. Какой вид возмущений по времени и координате при расчете течения в ячейке Хеле-Шоу по полной модели (с. 96)? Как зависит картина течения (рис. 3.6) от амплитуды и частоты возмущения? От выбора двух эмпирических параметров упрощенной модели?

5. В работе есть несколько терминологических погрешностей. В частности, не совсем уместно упоминание о сравнении с данными прямого численного моделирования (с. 12). Под этим обычно понимается применение полных трехмерных нестационарных уравнений Навье–Стокса. В работе выполнен расчет на основе двумерных уравнений (3.2), где есть ряд допущений: параболический профиль скорости по z , равенство нулю вертикальной скорости, малость ряда вязких членов в приближении тонкого сдвигового слоя. Правильнее было бы говорить о сравнении результатов, полученных по упрощенной одномерной модели автора, с данными более полной двумерной модели (3.2).

Замечены стилистические погрешности и опечатки (напр., в окончаниях слов – «вязких жидкости», «используются предложенная в [48;76] трехслойная схема» на с. 9). В целом, их плотность гораздо ниже обычной для диссертаций, практически нет грамматических ошибок, т.е. работа написана грамотно и ясно.

Приведенные замечания сводятся, в основном, к техническим деталям и погрешностям оформления, не сказываются на научных достижениях полученных результатов и не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация смотрится цельно, обладает внутренним единством, является законченным исследованием и содержит новые теоретические и численные решения актуальных задач механики жидкости и газа применительно к движению жидкости в тонких сдвиговых слоях. Это имеет существенное значение для развития фундаментальных основ и практических приложений математического моделирования течений сплошной среды.

Достоверность результатов работы достигается за счет применения надежных численных алгоритмов системы Matlab, протестированных в различных условиях, и сравнения характеристик течения с точными решениями и данными расчетов по моделям, предложенным в других работах (где эти модели, в свою очередь, сопоставлялись с экспериментами). Положения и выводы, сформулированные в диссертации, являются вполне обоснованными и вытекают из детального анализа полученных результатов с учетом опыта предыдущих работ в подобных течениях.

Содержание автореферата соответствует ключевым положениям и выводам диссертации. Результаты работы опубликованы в рецензируемых научных журналах и представлены на зарубежных и российских конференциях.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям и критериям, предъявляемым к кандидатской диссертации, а ее автор, Ковтуненко Павел Викторович, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы.

Я, Яковенко Сергей Николаевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Ковтуненко Павла Викторовича и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

С. Н. Яковенко

17.08.2017

доктор физико-математических наук, специальность ВАК 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы, доцент, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)
<http://www.itam.nsc.ru/>

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

Телефон: +7 (383) 330-42-68

E-mail: s.yakovenko@mail.ru

Подпись д.ф.-м.н. Яковенко С. Н. заверяю:



Яковенко (ю. В. Кратова)
Ученый секретарь Института