

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Очирова Артема Александровича на тему «Исследование закономерностей формирования массопереноса, инициируемого волновыми движениями жидкости», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

В диссертации исследованы закономерности волнового массопереноса в системах двухслойных жидкостей, при наличии тангенциального разрыва поля скоростей вдоль поверхности раздела. Учитывается поверхностное распределение электрического заряда на поверхности раздела, а также наличие поверхностно-активных веществ. Развитие данной тематики позволяет подробно охарактеризовать особенности массопереноса в таких системах, описать распределение скоростей и форму траекторий жидких частиц в двухслойных жидких средах с возмущенной поверхностью раздела жидкостей. Закономерности перераспределения поверхностно-активных веществ на возмущенной поверхности раздела протяженных водоемов, также изученные в диссертации, имеют очевидный практический интерес, связанный, в первую очередь, с разработкой методов мониторинга и прогнозирования распространения загрязнений по поверхности мирового океана. Кроме того, результаты диссертации в высокой степени актуальны в связи с многочисленными технологическими приложениями, имеющими дело с явлением волнового массопереноса в двухслойных средах с тангенциальным разрывом скоростей.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы, состоящего из 227 источников.

Во **введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Первая глава посвящена литературному обзору работ по исследованию волнового массопереноса (дрейфа Стокса) и траекторий движения индивидуальных частиц, формирующих движение жидкости, вызванное волновым возмущением её поверхности. Рассмотрены работы, посвященные исследованию дрейфа Стокса, с учетом неустойчивости поверхности раздела жидкости по отношению к тангенциальному разрыву скоростей (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца), к избытку поверхностного электрического заряда (неустойчивость Тонкса-Френкеля) и с учетом влияния различного рода пленок, распределенных вдоль поверхности жидкости. Приведен также обзор работ по расчету траекторий движения лагранжевых частиц жидкости в разного рода жидких системах.

Вторая глава посвящена построению асимптотического метода перехода от описания поля скоростей в переменных Эйлера к описанию скоростей частиц в переменных Лагранжа. Известная формула пересчета применима для малых

сдвигов жидких частиц. Предложенная диссертантом методика позволяет выполнять упомянутый пересчет для больших сдвигов жидких частиц. Для иллюстрации метода используется пример системы двух жидкостей с тангенциальным разрывом скоростей на границе раздела. Предполагалось, что вдоль границы раздела распространяется линейная монохроматическая волна. Вычислены дрейфовые слагаемые в лагранжевых скоростях или рассчитана скорость дрейфа Стокса в нижнем (предполагаемом неподвижном), и движущемся верхнем слоях жидкостей. Для корректного расчета дрейфа необходимо переходить в систему отсчета, дрейфующую с жидкими частицами. Получена уточненная форма записи лагранжевых компонент скорости жидких частиц в обоих слоях жидкости. В случае наличия поверхностного натяжения на поверхности раздела получена формула для скорости относительного движения жидких частиц по обе стороны от границы раздела для докритических значений скорости относительного движения слоев – это скорость меньше скорости относительного движения слоев. На начальном этапе развития неустойчивости в выражении для скорости дрейфа появляется экспоненциальный по времени множитель, причем дрейфовые добавки в слоях оказываются направленными в противоположные стороны и их экспоненциальный рост со временем приводит к уменьшению тангенциального разрыва скоростей, т. е. к стабилизации поверхности.

В **третьей главе** рассматривается случай, когда волновое возмущение представляет собой простейшую модулированную волну, а также учитывается распределение поверхностного электрического заряда, оказывающее влияние на круговую частоту волнового движения. Были получены выражения для дрейфовых скоростей в линейном приближении по отклонению волновых чисел в пакете. Показано, что для большого времени наблюдения, осредненная по периоду волны скорость дрейфа, определяемая этой формулой, отличается от скорости дрейфа задаваемой классической формулой Стокса примерно в два раза. Показано также, что круговая частота поверхностных капиллярно-гравитационных волн уменьшается с увеличением поверхностного электрического заряда и принимает нулевое значение при критическом значении параметра Тонкса-Френкеля. Показано, что наличие поверхностного электрического заряда усиливает неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, а последняя неустойчивость реализуется при меньших критических скоростях и наоборот, в присутствии относительного движения слоев необходим меньший поверхностный заряд для реализации неустойчивости Тонкса-Френкеля. Показано, что изменение частоты волнового движения, вследствие наличия заряда на поверхности раздела, приводит к пропорциональному изменению скорости среднего массопереноса.

В **четвертой главе** рассмотрена вязкая жидкость, по поверхности которой распределено поверхностно-активное вещество (ПАВ) с переменной плотностью,

образующее нерастворимую пленку. Получено дисперсионное уравнение, анализ которого показал, что в присутствии ПАВ на поверхности жидкости реализуется как гравитационно-капиллярные волны, так и волны Марангони. Было также исследовано влияние присутствия ПАВ на траектории движения индивидуальных частиц: с увеличением упругости пленки траектории из эллиптических вырождаются в отрезки прямых. Дальнейшее увеличение упругости приводит к изменению ориентации эллиптической траектории. Рассмотрено влияние тангенциального разрыва на динамику волнового движения в присутствии ПАВ. Отдельно и подробно рассмотрен практически важный вопрос о перераспределении вещества плёнки относительно картины волнового возмущения поверхности. Проведено исследование влияния скорости движения идеальной сплошной среды над поверхностью плёнки на это перераспределение и на интенсивность гашения капиллярно-гравитационных волн. Получена формула для скорости дрейфовых движений при распространении волны вдоль поверхности жидкости.

Достоверность научных результатов, представленных в работе, обеспечивается использованием математически корректных моделей и подходов, стандартных для механики сплошной среды; соответствием результатов расчетов известным из научной периодики экспериментальным данным по определению траекторий движения индивидуальных жидких частиц в двухслойной системе жидкостей.

В диссертационной работе представлен целый ряд новых результатов, имеющих важное теоретическое и прикладное значение:

- разработана оригинальная методика расчета скорости дрейфовых движений и траектории движения индивидуальных жидких частиц;
- получены аналитические выражения для скоростей средних дрейфовых течений, формирующихся по разные стороны от границы раздела жидких сред на начальных этапах развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Показано, что возникающие в середине течения являются причиной уменьшения величины тангенциального разрыва поля скоростей, инициировавшего неустойчивость;
- получены аналитические выражения для закона перераспределения концентрации в плёнке поверхностно-активного вещества, распределенного вдоль возмущенной волновым движением поверхности раздела вязкой и идеальной жидкостей с учётом тангенциального разрыва скоростей на границе;
- получены аналитические выражения для скорости волнового массопереноса в жидкости произвольной вязкости, покрытой упругой плёнкой поверхностно-активного вещества.

В диссертации имеются недочёты. В работе присутствуют опечатки и стилистические неточности, а также отсутствует пояснение некоторых символов, например:

- на стр. 14 в обзорной главе при введении определения толщины приповерхностного слоя не указан смысл величины, обозначаемой v .
- в 1-ой главе на стр. 19 в выражении для скорости дрейфа внутри приповерхностного вязкого слоя не пояснена величина, обозначаемая символом n .
- на стр. 54, когда речь идет о сумме скоростей эйлера потока и скорости дрейфа Стокса непонятно, о какой сумме идет речь о векторной сумме или алгебраической.

Приведенные замечания немногочисленны и имеют чисто технический характер и в никакой мере не снижают ценности и качества научных исследований, представленных в диссертации и высокой оценки работы в целом

Содержание автореферата полностью отражает основное содержание диссертации.

Диссертация прошла апробация на всероссийских и международных конференциях и научных семинарах. Выносимые на защиту научные положения достаточно полно отражены в 45 публикациях, в том числе в 6 статьях в изданиях, включенных в перечень ВАК, в 1 статье, опубликованной в изданиях, входящих в международную базу цитирования ZbMath, в 1 статье, опубликованной в изданиях, входящих в международную базу цитирования Web of Science и в 2 статьях, опубликованных в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus. Опубликованные работы соответствуют тематике диссертации.

В связи с изложенным, я считаю, что представленная диссертация «Исследование закономерностей формирования массопереноса, инициируемого волновыми движениями жидкости» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Очиров А.А. безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
Математического ин-та им. В.А. Стеклова РАН,
профессор

А.Т. Ильичев

26 октября 2020 г.

Подпись
А.Т. Ильичёва заверяю

