

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Дьяковой Вероники Вадимовны «Экспериментальное изучение динамики жидкости и сыпучей среды во вращающемся горизонтальном цилиндре», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация Дьяковой В.В. посвящена исследованию динамики гетерогенных систем, находящихся в неоднородных и переменных полях инерционных сил. В таких условиях разность физико-химических, и в первую очередь, инерционных, свойств фаз, входящих в состав гетерогенной системы, может приводить к формированию осредненных течений или к возникновению неустойчивости межфазной границы раздела, что, в свою очередь, может существенно изменить интенсивность тепло и массопереноса в среде. Разнообразие наблюдаемых специфических гидродинамических явлений и особенности их теоретического описания привели к выделению вибрационной гидромеханики в отдельную область гидродинамики, активно развивающуюся в течение последних десятилетий. Интерес исследователей обусловлен разнообразием технологических и природных систем, в которых пространственно-временные вариации массовых сил играют определяющую роль в формировании структуры и интенсивности потоков тепла и массы. Всестороннее изучение физических механизмов является ключом как к проектированию эффективных промышленных технологий, так и лучшему пониманию человеком множества климатических и астрономических явлений. Особенно здесь важен вклад лабораторного моделирования, результаты которого выступают как в качестве критерия адекватности различных теоретических подходов, так и источника для верификации различных численных пакетов, разрабатываемых для компьютерного моделирования технологических и природных процессов. В свете вышесказанного представляемое к защите диссертационное исследование, безусловно, актуально, а его результаты будут неизбежно востребованы исследователями, занимающимися как фундаментальными, так и прикладными проблемами в различных областях знаний.

Диссертация Вероники Вадимовны представляет собой логически построенное и завершённое исследование. Название диссертации – «Экспериментальное изучение динамики жидкости и сыпучей среды во вращающемся горизонтальном цилиндре» – адекватно отражает суть работы. Она состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации 118 страниц, включая 54 рисунка и список цитируемой литературы из 129 наименований.

Во *введении* обосновывается актуальность темы исследований, степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов и информация о структуре работы.

В *первой главе* диссертации представлены результаты экспериментального исследования динамики трехфазной системы, содержащей газ, жидкость и сыпучую среду, в равномерно вращающемся горизонтальном цилиндре. В начале главы приведено подробное описание экспериментального комплекса, физико-химические характеристики жидкой и сыпучей сред, а также описаны основные измерительные методики и последовательность проведения эксперимента. Обнаружено, что при быстром вращении, когда центростремительное ускорение на порядок превышает ускорение силы тяжести, система переходит в центрифугированное состояние, формируя трехслойную систему. При этом газовая фаза формирует слой, несимметрично расположенный относительно оси вращения, что обусловлено влиянием силы тяжести. В системе отсчета полости это приводит к возникновению колебаний границы раздела газ-жидкость. Показано, что при уменьшении скорости вращения амплитуда колебаний растет, что, в конечном итоге, приводит к резонансному возбуждению азимутальной бегущей волны на поверхности газ-жидкость. Сообщается об обнаружении волн с азимутальным волновым числом от одного до пяти. Показано, что появление волн на поверхности жидкости приводит к формированию рельефа на поверхности жидкость-сыпучая среда в виде параллельных холмов, вытянутых вдоль оси вращения. Дальнейшее уменьшение скорости вращения приводит к неустойчивости центрифугированного состояния и обрушению трехслойной системы. В разделе 1.2 представлены результаты исследования положение границ возникновения каждого из режимов в зависимости от массы сыпучей среды, количества и вязкости жидкости и размеров полости. Предложены безразмерные комплексы, позволяющие объединить результаты экспериментов и провести сравнение с результатами теоретических исследований. В разделе 1.3 подробно исследованы течения, генерируемые в жидкости азимутальной бегущей волной. Исследованы частота и амплитуда колебательного движения жидкости и показано, что именно наличие осцилляций жидкости приводит к ожижению слоя сыпучей среды и формированию стационарного рельефа. Показано, что распространение волны на поверхности жидкости приводит также к появлению осредненного течения в объеме в направлении движения волны. Для описания обоих типов течения предложены безразмерные комплексы и проведено сравнение с результатами теоретических исследований. В разделе 1.4 приведены

результаты исследования пространственно-временных характеристик азимутальной бегущей волны и проведено их сравнение с результатами теоретических исследований.

Во *второй главе* диссертации представлены результаты исследования устойчивости границы раздела жидкость – сыпучая среда в равномерно вращающемся горизонтальном цилиндре при наличии газовой фазы. Показано, что формирование азимутальной волны на границе газ-жидкость приводит к пороговой генерации рельефа на поверхности сыпучей среды в виде вытянутых вдоль оси вращения холмов. Подробно исследованы пространственно-временные характеристики формирующегося рельефа в зависимости от частоты вращения, объема и вязкости жидкой фазы. Обнаружено, что структура рельефа, возникающего вблизи порога, сохраняется неизменной в течение длительного времени, в то время как пространственно-временные характеристики рельефа, формирующегося в надкритической области, демонстрируют более сложную эволюцию, заключающуюся в дрейфе структур с их постепенной трансформацией в дюны. Показано, что такое поведение связано с формированием интенсивного осредненного течения в надкритической области. Предложен комплекс безразмерных параметров, позволяющий описать результаты экспериментов единой зависимостью. В конце главы проведен анализ результатов исследования, представленных в первых двух главах. Показано, что изучение неустойчивости поверхности раздела между жидкостью и сыпучей средой в трехфазной системе имеет ряд ограничений и недостатков. Обосновано проведение исследований в неравномерно вращающемся (либрирующем) горизонтальном цилиндре, содержащем жидкость и сыпучую среду.

В *третьей главе* диссертации представлены результаты исследования неустойчивости границы раздела между жидкостью и сыпучей средой в быстро вращающемся горизонтальном цилиндре, частота вращения которого промодулирована. Возникающее в результате движение, называемое либрациями, генерирует колебания жидкости относительно стенок полости, что способно привести, при определенных условиях, к формированию инерционных волн и неустойчивости границы раздела фаз. В начале главы приведено подробное описание экспериментального комплекса, характеристики жидкой и сыпучей сред, а также описаны основные измерительные методики и последовательность проведения эксперимента. В разделе 3.2 подробно изучены условия формирования и структура инерционных волн. Показано, что появление волн приводит к формированию осредненных течений, способных негативно повлиять на изучение неустойчивости поверхности сыпучей среды. Определен диапазон параметров, при которых влияние волн на процесс развития неустойчивости минимально. В разделе 3.3 представлены результаты

исследования неустойчивости изначально осесимметричной границы раздела между жидкостью и сыпучей средой, вызванной колебаниями жидкой фазы в либрирующем цилиндре. Показано, что при увеличении интенсивности либраций на поверхности сыпучей среды пороговым образом формируется рельеф в виде холмов, вытянутых вдоль оси вращения. Обнаружено, что области неустойчивости могут быть однозначно определены в пространстве безразмерных параметров число Рейнолдса – число Шильдса. Показано согласие экспериментальных данных с результатами теоретических исследований в области больших чисел Рейнолдса. В разделе 3.4 представлены результаты исследования пространственно-временных характеристик рельефа в зависимости от вязкости жидкости, диаметра частиц сыпучей среды, амплитуды колебаний жидкости, скорости вращения и частоты либраций. Обнаружен дрейф структур в азимутальном направлении. Показано, что пространственный период структур не зависит от вязкости жидкости, размера частиц сыпучей среды и частоты колебаний жидкости и определяется угловой амплитудой колебаний жидкости вблизи кольцевого слоя сыпучей среды и толщиной этого слоя. Приведено сравнение с результатами, полученными в предыдущих главах, а также другими экспериментальными исследованиями.

В *заключении* сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Замечания по содержанию диссертации:

1. Во введении приведен прекрасный обзор предыдущих исследований по тематике диссертации, который почему-то слабо используется в дальнейшем. Например, автор не пытается провести сравнение с результатами, полученными в поле силы тяжести (стр. 11-13 диссертации, формулы (1)-(3), например). Такое сравнение видится полезным, учитывая единый физический механизм формирования песчаных структур в покоящихся и вращающихся системах. Другим примером является представленная на стр.11 классификация песчаных структур (орбитальные, неорбитальные, суборбитальные), которая потом нигде не используется в диссертации.
2. При описании экспериментальной установки в Главе 1 упомянут цилиндр переменной длины. К сожалению, не указано, как конструктивно реализовано изменение длины цилиндра.
3. Толщина слоя сыпучей среды, использованной в Главах 1 и 2, меняется в пределах от 7 до 30 диаметров частиц. Можно ли говорить о сплошной среде в таком случае? И

существует ли количественный критерий, на основании которого можно выбрать корректное соотношение толщины слоя сыпучей среды и размера отдельного ее элемента?

4. На Рис.1.5 приведена кривая $\Gamma=1/3$, соответствующая, как утверждает автор, порогу устойчивости центрифугированного слоя, полученному в исследовании (Phillips O. M. Centrifugal waves // Journal of Fluid Mechanics. – 1960. – Т. 7. – №. 3. – С. 340-352). На самом деле в указанной работе этот порог соответствует случаю бесконечно тонкого слоя жидкости, когда $q \rightarrow 0$, тогда как для слоя конечной толщины порог устойчивости

зависит от толщины слоя $\Gamma = \frac{\sqrt{1-q}}{3}$ (см. уравнение 3.14 в указанной работе). В той же

работе приведены результаты экспериментальных наблюдений. Интересно было бы увидеть сравнение результатов, полученных в диссертации, как с указанной выше теоретической зависимостью, так и с экспериментальными результатами.

5. Непонятны количественные критерии, по которым автор относит наблюдаемые в экспериментах структуры к «холмам с плоскими вершинами» или «регулярным синусоидальным холмам». Из текста возникает впечатление субъективности выбора.

6. Контролировалось ли отсутствие нутаций оси вращения цилиндра с помощью каких-либо датчиков? Представляется, что опасность появления нутаций достаточно велика в случае длинных цилиндров, закрепленных только с одного торца.

Сделанные выше замечания вовсе не исключают общую положительную оценку диссертационного исследования. В целом диссертация Дьяковой В.В. оставляет благоприятное впечатление. Работа хорошо оформлена и иллюстрирована. Большинство результатов получено впервые и представляет несомненный научный интерес. Многие вопросы, поднятые в работе, создают основу для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Достоверность результатов и обоснованность положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений. Список публикаций по теме диссертации состоит из 14 печатных работ, из них 4 публикации в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов кандидатских диссертаций, 5 публикаций в сборниках научных статей, 5 публикаций в трудах конференций. В публикациях достаточно полно отражены основные результаты, представленные в диссертации. Результаты диссертационного исследования докладывались на многочисленных научных конференциях и семинарах. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Заключение. Считаю, что диссертация Дьяковой Вероники Вадимовны является оригинальной, завершенной научно-квалификационной работой, которая по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и их научно-практической значимости удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сама Дьякова В.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий лабораторией гидродинамической устойчивости
«Института механики сплошных сред УрО РАН» – филиала
ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН»,
614013, г. Пермь, ул. Академика Королева д.1,
тел.: +7(342)2378314, e-mail: alex_mizev@icmm.ru


/Мизев Алексей Иванович/

05.11.2020

Подпись Алексея Ивановича Мизева удостоверяю:

Подтверждаю, что А.И. Мизев не входит в состав членов диссертационного совета Д 004.036.01, утвержденных приказом Минобрнауки России N 87/нк от 26 января 2018 г.

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН




/Н.А. Юрлова/