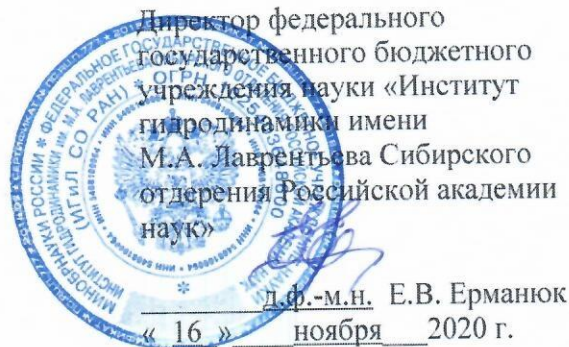


«УТВЕРЖДАЮ»



Директор федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук»

д.ф.-м.н. Е.В. Ерманюк

« 16 » ноября 2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения
Российской академии наук»

о диссертационной работе Дьяковой Вероники Вадимовны «Экспериментальное изучение динамики жидкости и сыпучей среды во вращающемся горизонтальном цилиндре», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Дьяковой В.В. посвящена экспериментальному исследованию устойчивости структур на границе раздела жидкости и сыпучей среды во вращающемся горизонтальном цилиндре.

Динамика кольцевого слоя жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре в поле силы тяжести подобна динамике жидкости в полости, совершающей неравномерное вращение. Во вращающемся и совершающем колебания вокруг горизонтальной оси вращения цилиндре жидкость участвует одновременно в двух видах движения: равномерном вращении и азимутальном колебательном движении. Подобная суперпозиция течений наблюдается как при вибрациях полости, так и в равномерно вращающемся горизонтальном цилиндре в поле силы тяжести. Несмотря на большое количество исследований, посвященных изучению динамики жидкости и сыпучей среды во вращающихся горизонтальных полостях, многие аспекты этой проблемы требуют дополнительного изучения. Это указывает на необходимость проведения систематических исследований по данной проблеме, которая связана с целым рядом прикладных задач, таких как образование донного рельефа, перенос донных отложений, организация технологических процессов во вращающихся реакторах при наличии гранулированных слоев, оценка волновых процессов и вторичных течений, вызванных либрационными возмущениями во вращающихся гео- и астрофизических системах.

Актуальностью данной темы и объясняется проведение диссертационного исследования.

Оценка содержания диссертации.

Рецензируемая диссертационная работа характеризуется полнотой и завершенностью. Текст диссертации состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении проведен глубокий анализ литературы, относящейся к основным аспектам рассматриваемой задачи, таким как: волновые процессы и осредненные течения во вращающихся системах, динамика сыпучих сред в осциллирующей жидкости,

образование рельефа на поверхности сыпучих сред, влияние либраций границ на динамикувращающейся жидкости. На основе проведенного анализа литературы обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цели и задачи. Описана структура диссертации, кратко изложено содержание трех глав, выделены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту. В конце введения приведены сведения об апробации работы, количестве публикаций по теме диссертации и личном вкладе автора.

Первая глава посвящена исследованию динамики трехфазной системы (жидкость, сыпучая среда, газ) во вращающемся цилиндре. Приведено подробное описание методики исследования, экспериментальной установки и процедуры проведения опытов. Исследована устойчивость системы, экспериментально определены пороги центрифугирования и их зависимость от основных параметров задачи, определен диапазон существования азимутальных волн на свободной поверхности жидкости и диапазон рельефообразования на границе раздела жидкость – сыпучая среда. Обнаружено, что рельеф, как правило, образуется при наличии бегущих волн на свободной поверхности жидкости. Выполнено исследование осредненного движения в центрифугированном слое жидкости, проанализирован механизм возникновения осредненного течения, проведено сопоставление полученных результатов с теоретическими оценками. Определена зависимость безразмерной частоты колебаний жидкости от относительного наполнения полости для волн с азимутальными числами 1-5, представлена убедительная теоретическая интерпретация полученных данных.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию того факта, что изначально близкая к осесимметричной граница раздела между жидкостью и сыпучей средой в быстро вращающемся горизонтальном цилиндре неустойчива к образованию квазистационарного рельефа в виде холмов, вытянутых вдоль оси вращения. Определены пороги возмущения азимутальных волн, для случая регулярных симметричных азимутальных холмов показано, что результаты измерений пространственного периода холмов могут быть представлены в виде обобщенной зависимости. Представляет большой интерес исследование долговременной эволюции рельефа, приводящее как к регулярным, так и нерегулярным формам рельефа.

В третьей главе экспериментально исследуется устойчивость границы раздела между сыпучей средой и жидкостью в неравномерно вращающемся горизонтальном цилиндре. Изучено влияние инерционных волн, возникающих в местах контакта торцевых стенок и частиц, на динамику поверхности раздела жидкость-сыпучая среда. Показано, что в длинных цилиндрах отражение инерционных волн от поверхности сыпучей среды приводит к осевой периодичности рельефа поверхности, а в случае коротких цилиндров первое отражение происходит от торцевой стенки, что значительно снижает их влияние на форму поверхности сыпучей среды. Для коротких цилиндров построена фазовая диаграмма устойчивости границы раздела жидкость-сыпучая среда. Экспериментально подтверждено, что значение критического числа Шильдса согласуется с теоретическими предсказаниями при числах Рейнольдса $Re > 100$.

Изучено влияние амплитуды изменения скорости вращения на форму границы раздела, а также временная динамика этой границы. Показано, что в начале эксперимента граница раздела нерегулярная, но со временем процесс устанавливается и форма границы раздела не изменяется. В квазистационарном случае слой сыпучей среды имеет вид холмов с несимметричными склонами. Дано возможное объяснение данной асимметрии. Экспериментально продемонстрировано, что при увеличении амплитуды изменения скорости вращения увеличивается и азимутальный размер холмов в установившемся состоянии. Показано, что зависимость размера холмов от амплитуды колебаний жидкости качественно совпадает для жидкостей различной вязкости и частиц различных диаметров.

При изучении временной динамики поверхности раздела выявлено, что в установившемся течении холмы мигрируют в азимутальном направлении, причем дрейф может быть направлен как по направлению вращения цилиндра, так и против. В работе построены графики зависимости относительной скорости дрейфа от интенсивности колебания жидкости и предложено возможное объяснение данному эффекту. Построена зависимость азимутальной ширины холмов от амплитуды колебаний жидкости. Показано, что в случае тонкого слоя сыпучей среды рост холмов может быть ограничен количеством частиц.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты исследований и определены перспективы дальнейшей работы.

Следует отметить следующие полученные в диссертации **основные результаты**:

1. В равномерно вращающемся горизонтальном цилиндре, частично заполненном жидкостью и сыпучей средой: - определены пороги центрифугирования и обрушения кольцевых слоев жидкости и сыпучей среды, возбуждения бегущих азимутальных волн на свободной поверхности жидкости, образования квазистационарного рельефа на поверхности сыпучей среды; - исследованы волновые процессы и осредненные азимутальные течения в жидкости; - изучена динамика пространственно-периодического рельефа на поверхности сыпучей среды.

2. В неравномерно вращающемся (либрирующем) горизонтальном цилиндре, заполненном жидкостью и сыпучей средой: - изучены условия возникновения пространственно-периодического рельефа; - определены параметры, влияющие на пространственный период квазистационарного рельефа; - изучена скорость азимутального дрейфа пространственно-периодического рельефа.

Научная и практическая значимость работы имеет мультидисциплинарный характер. Исследование особенностей формирования рельефа на поверхности сыпучих сред во вращающейся полости позволяет обобщить ряд особенностей формирования песчаных структур в прибрежных зонах, что имеет большое значение в задачах исследования придонных экосистем и надежности подводной инфраструктуры. Кроме того, динамика гранулированных материалов представляет большой практический интерес в связи с их широким использованием в различных реакторах, применяемых для оптимальной организации процессов сушки, нагрева, химических реакций. Воздействие либраций на вращающиеся системы, также рассмотренное в настоящей работе, встречается как в технических приложениях, так и в многочисленных задачах гео- и астрофизической гидродинамики.

Таким образом, поведение жидкости и сыпучей среды в горизонтальном вращающемся цилиндре представляет значительный научный и практический интерес для широкого спектра прикладных задач.

Достоверность результатов обосновывается тщательной разработкой методик проведения экспериментов, подтверждается сравнением полученных результатов с известными данными других теоретических и экспериментальных работ.

По содержанию диссертационной работы имеется несколько замечаний:

1. Относительно экспериментальных методик, примененных в данной работе, можно выразить пожелание разработки программ для пакетной автоматической обработки данных о профиле свободной поверхности и профиле рельефа дна. Пакетная обработка

- позволит применить целый спектр разнообразных методов анализа движения волновых профилей.
2. Большинство экспериментальных данных получено при постепенном ступенчатом снижении частоты вращения системы. Можно предположить, что гистерезис в системе отсутствует, однако автору следовало бы указать на это в явном виде.
 3. В диссертации нет анализа возможного влияния вращения шариков сыпучей среды на геометрию холмов и дюн на границе раздела сыпучей среды и жидкости. Такое влияние вполне возможно, по крайней мере в поверхностном слое сыпучей среды, так как из работ Власовой О.А. и Карпунина И.Э. следует, что угловые скорости вращения шариков и кюветы различны.
 4. Визуально на рисунке 3.13 количество взвешенных в потоке (оторвавшихся от профиля дюн) частиц в случае д) меньше, чем в случае г), хотя амплитуда колебаний угловой скорости больше в д) чем в г). С чем это может быть связано? Может быть фото г) и д) перепутаны местами?
 5. Было бы желательно исследовать основные закономерности образования рельефа на границе раздела сыпучей среды и жидкости для нескольких значений характерных диаметров сфер.
 6. В диссертации в качестве масштаба широко используется толщина пограничного слоя Стокса на колеблющейся пластине. Можно отметить, что существует работа, в которой определено критическое число Стокса (определенное по амплитуде колебаний, частоте и вязкости жидкости), при превышении которого ламинарное решение задачи Стокса пороговым образом теряет устойчивость. В приложениях существование этого порога может иметь существенное значение: Букреев В.И. Экспериментальная проверка диапазона применимости решения второй задачи Стокса // Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. №4. С. 26-31.
 7. На стр. 29 имеется фраза: «Измеренная пористость сыпучей среды, равная отношению объема пор между частицами сыпучей среды к полному объему среды, составляет 40%.» Этот результат никак не комментируется в диссертации, хотя он крайне интересен сам по себе. Пористости различных упаковок сфер посвящена интересная литература (начиная с Кеплера и Гаусса). Пористость 40% (средняя объемная плотность упаковки 0.6) соответствует, в англоязычной терминологии, границе между loose random packing и poured random packing. Окрестность данной пористости рядом авторов рассматривается как окрестность границы фазового перехода, при котором меняется сопротивление пористой среды сдвигу. Этот вопрос обсуждается, в частности, в статье Schröter M., Nägele S., Radin C., Swinney H.L. Phase transition in a static granular system // Eur. Phys. Lett. 2007. V. 78:44004. Тот факт, что экспериментальная система сама выбирает именно это значение пористости очень любопытен и стимулирует дальнейшее развитие методики эксперимента: являются ли средние пористости в районе горбов и впадин рельефа одинаковыми? Отметим также, что существует литература по ряду задач механики гранулированной среды, в которых искусственно создавалась высокая пористость, что приводит к интересным динамическим эффектам (см. обзор van der Meer D. Impact on granular beds // Annual Rev. Fluid Mech. 2017. V. 49. P. 463-484.).

Заключение

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области экспериментального исследования гидродинамических течений и рельефообразования в средах, содержащих жидкость и тяжёлую сыпучую компоненту, под действием вращения и вибрационных воздействий.

Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Основные результаты исследований опубликованы в 27 работах, включая 4 статьи в журналах из списка ВАК. Работа прошла апробацию на многочисленных конференциях российского и международного уровня и соответствует специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа «Экспериментальное изучение динамики жидкости и сыпучей среды во вращающемся горизонтальном цилиндре» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Дьяковой Вероника Вадимовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа обсуждалась на научном семинаре «Прикладная гидродинамика» федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН» протокол заседания № 15 от 11.11.2020 г. Отзыв обсужден и одобрен на заседании №16 от 16.11.2020 г.

Заведующий лабораторией
фильтрации ИГиЛ СО РАН
доктор физико-математических наук
Шелухин Владимир Валентинович

Руководитель семинара «Прикладная гидродинамика»
директор ИГиЛ СО РАН
доктор физико-математических наук
Ерманюк Евгений Валерьевич

630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15
тел.: +7 (383) 330 22 95, +7(383) 330 12 41
e-mail: shelukhin@hydro.nsc.ru
ermanyuk@hydro.nsc.ru

Подпись Шелухина В.В.,

Ерманюка Е.В.

заверю

И.о. ученого секретаря



Е.В.К