

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Бердникова В.С. на диссертацию Мизева Алексея Ивановича “Тепловая и концентрационная конвекция Марангони в задачах с плоской и цилиндрической геометрией”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

В диссертационной работе Мизева А.И. систематизированы результаты экспериментальных исследований условий возникновения, структуры и физических механизмов гидродинамической неустойчивости термокапиллярной и концентрационно-капиллярной конвекции в жидких системах (однородная жидкость, бинарные смеси, разбавленные суспензии) плоской и цилиндрической геометрий при различных способах создания неоднородности на межфазной поверхности.

Актуальность темы работы определяется в первую очередь тем, что во многих наукоемких технологических процессах присутствуют свободные поверхности жидкостей и расплавов, межфазные границы раздела жидкость-газ или границы раздела несмешивающихся жидкостей. В подавляющем большинстве случаев технологические системы неизотермические и в наземных условиях они находятся в поле тяжести. Поэтому неизбежно возникает термогравитационная конвекция в системах с жесткими границами или тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в системах со свободными границами. При наличии вынужденного течения обязательно возникает вопрос об относительной роли сил плавучести в генерацию конвективного течения и их вклада в процессы тепло- и массопереноса. При анализе процессов тепло- и массопереноса в неизотермических системах со свободными границами возникает вопрос об относительной роли сил плавучести и термокапиллярного эффекта (или термокапиллярной конвекции). Примеры технологических процессов, в которых эти проблемы являются ключевыми, это в первую очередь выращивание монокристаллов из расплавов методами направленной кристаллизации, такими как методы Чохральского, бестигельной зонной плавки (БЗП), горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК) и в многочисленных вариантах метода зонной плавки, применяемой для очистки материалов (в первую очередь полупроводников). Несмотря на большое количество работ в данной области, говорить о какой либо завершенности невозможно, так как все перечисленные методы многовариантны и расширяется номенклатура материалов, кроме того общей тенденцией является увеличение габаритов монокристаллов и одновременно ужесточение требований к их кристаллографическому совершен-

ству. Увеличение габаритов кристаллов приводит к увеличению абсолютных размеров ростовых узлов, в результате чего возникает проблема устойчивости течений расплавов, ламинарно-турбулентные переходы и турбулентные режимы течений. Соответственно кардинально меняются режимы тепло- и массообмена в системах тигель-расплав-кристалл. Даже этих примеров достаточно для обоснования необходимости фундаментальных исследований данного класса задач, результаты которых нужны для понимания сути происходящих процессов и целенаправленного поиска методов оптимизации существующих вариантов технологий и разработки новых. Все выше сказанное относится к системам с идеально чистыми расплавами и чистыми газовыми средами в ростовых узлах. Но все реальные материалы обладают конечным уровнем очистки. Кроме того высокотемпературные расплавы практически всегда взаимодействуют со стенками тиглей, в расплавы часто добавляются примеси, необходимые для получения материалов с заданными свойствами. В некоторых вариантах примеси вводятся в расплав из газовой среды и через свободную поверхность расплавов. Поэтому в системах с межфазной границей конвективное движение может генерироваться силами плавучести и поверхностными силами, возникающими при наличии не только градиентов поверхностного натяжения, обусловленных неоднородным распределением температуры, но и за счет изменения химического состава, как в объеме, так и вдоль границы раздела. Границы раздела несмешивающихся жидкостей присутствуют, например, в вариантах метода Чохральского с жидкостной герметизацией при выращивании монокристаллов арсенида галлия (и других расплавов с летучими компонентами). Т.о. результаты данной работы являются заметным вкладом в разработку нового раздела – межфазная гидродинамика, в рамках направления - технологическая гидродинамика. Актуальность работы не вызывает сомнений.

Новизна результатов работы обусловлена в первую очередь тем, что впервые выполнены систематические экспериментальные исследования, направленные на изучение физических механизмов взаимодействия поверхностных изотермических и неизотермических течений с адсорбированным слоем и их роли в неустойчивости конвективных течений. Большинство предшествующих исследований относятся к случаям термокапиллярной (когда движение жидкости на границе раздела обусловлено температурной зависимостью поверхностного натяжения) или тепловой гравитационно-капиллярной конвекции, работ, посвященных изучению концентрационно-капиллярной конвекции, возникающей вследствие зависимости поверхностного

натяжения от концентрации поверхностно-активной примеси на границе раздела, значительно меньше. Еще меньше работ с учетом влияния всех трех факторов.

Достоверность результатов и обоснованность научных положений и выводов представленных в диссертации обеспечивается применением современных апробированных экспериментальных методов измерений и техники; тщательной калибровкой датчиков и зондов; сопоставлением полученных результатов с известными результатами теоретических и экспериментальных работ других авторов.

Научная значимость результатов работы заключается в том, что результаты диссертации важны с общетеоретической точки зрения для развития знаний в области гидродинамики и тепло-массообмена в системах с неоднородными пространственно-временными распределениями температуры и концентрации поверхностно активных веществ, имеющих свободные границы жидкостей и расплавов или границы раздела несмешивающихся жидких сред. Эти результаты могут быть полезны при моделировании технологических процессов получения особо чистых веществ, при выращивании монокристаллов, в пищевой и химической промышленности.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что изученные в ней процессы играют определяющую роль в таких технологических процессах, как выращивание кристаллов различными методами направленной кристаллизации. Полученные данные необходимы для создания методов управления и оптимизации технологических процессов. Разработанные новые экспериментальные методики исследований межфазной гидродинамики найдут широкое применение в институтах РАН.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы, включающего 239 наименований. Работа содержит 84 рисунка и 6 таблиц. Общий объем диссертации составляет 277 страниц.

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

Замечания к Введению:

В списке литературы слишком мало ссылок на отечественные работы. В то же время в Институтах гидродинамики и теплофизики СО РАН по теме диссертации были проведены исследования тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в горизон-

тальных слоях, подогреваемых снизу и с продольным градиентом температуры, в методах Чохральского и горизонтальной направленной кристаллизации (в частности неполный список работ в ИТ СО РАН: ДАН СССР. 1976. Т. 231, N2, С. 309-311; Heat transfer, Soviet Research, 1978. V. 10, N5. P. 126-135; Heat transfer, Soviet Research, 1978, v.11, N3, P. 13-24; Изв. АН СССР. ФАО. 1979. Т. 15, N 11. С. 1168-1174; Fluid Mech., Soviet Research. V. 9, N 6, 1980. P. 1-36; Int. J. Heat Mass Transfer. 1984. Vol.27. N9. PP. 1595-1611; Fluid Mech., Soviet Research. 1986, v.15, N 1. P.118-133; Heat Transfer. Soviet Research. 1989. V. 21. N 6. P.828-845; Russian J. Engineering Thermophys. 1991. V.1, N 3. P.245-257; Инженерно-физический журнал, 2001, Т. 74, № 4, С. 122-127; ИФЖ, 2001, Т. 74, № 4, С. 116-121; Изв. ВУЗов., Материалы электронной техники. 2007, № 4, с.19-27; Изв. ВУЗов. МЭТ, 2008, № 3, С. 4-17; Автометрия. 2012, т. 48, № 3, с. 111-120; Известия РАН. Серия Физическая. – 2017. – Т 81. – № 10. – С. 1395 - 1402; Известия РАН. Серия Физическая. – 2017. - Т81.– № 10. – С. 1389-1394.) Есть работы сотрудников Института проблем механики РАН и других организаций.

В первой главе представлены результаты экспериментальных исследований структуры и устойчивости конвективного течения n -декана тепловой гравитационно-капиллярной природы, генерируемого затопленными локализованными источниками тепла двух типов: источник с твердыми границами и проницаемый источник, индуцированный сфокусированным излучением. Первый источник тепла – латунная насадка (стаканчик диаметром 5 или 7 мм, высотой 2 мм и толщина стенки 0,7 мм), которая крепилась на торце стеклянной трубки того же диаметра. Внутри насадки помещался электронагреватель из манганиновой проволоочки, мощность которого менялась в диапазоне от 0 до 2Вт. Исследована зависимость формы поверхности жидкости от глубины залегания источников тепла. Обнаружено, что над при малых глубинах погружения над латунным диском на свободной поверхности формируется волна. В зависимости от мощности источника тепла и глубины погружения волна может быть или цилиндрической или спиральной. В спиральной волне количество рукавов растет по мере увеличения мощности или приближения к поверхности. Исследованы пространственно-временные характеристики волн.

Замечания по главе 1.

1. Не приведены теплофизические свойства рабочей жидкости. Нет оценок чисел Рэлея и Марангони.

2. Не обсуждается роль подогрева стеклянной трубки на формирование восходящего термогравитационного течения и его взаимодействие с течением над торцом латунного диска.

3. Нет данных о характерных временах проведения экспериментов и нет данных о зависимостях температуры вдоль свободной поверхности и по высоте слоя. Требуется дальнейших исследований структура течения (поля скорости и температуры) над торцом источника тепла.

Во второй главе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований структуры и устойчивости гравитационного и концентрационно-капиллярного конвективного течения, генерируемого затопленным локализованным источником массы. Рабочей средой была вода высокой степени очистки. Источником ПАВ служили капли слаборастворимых одноатомных спиртов – от бутанола до гексанола, имеющие разные свойства, что позволяло менять параметры источника. Капля формировалась в глубине на конце тонкой (0.9 мм) иглы. Эксперименты были проведены в прямоугольной узкой кювете $90 \times 45 \times 3,8$ мм³, широкие стеклянные стенки которой формировали ячейку интерферометра Физо, применяемого для изучения распределения концентрации в объеме жидкости. Для измерения локальной скорости течения применялся миниатюрный анемометрический датчик. Для визуализации структуры течения были добавлены светорассеивающие частицы. Экспериментально показано, что, в отличие от источника тепла, режим конвективного движения может быть как колебательным, так и стационарным, в зависимости от свойств применяемого ПАВ. Автоколебательный режим может продолжаться часами вплоть до полного растворения капли. В этом случае ПАВ, диффундирующий из капли, всплывает в виде конвективного факела к поверхности, где возбуждает интенсивную концентрационно-капиллярную конвекцию. Движение жидкости гомогенизирует приповерхностный слой, вследствие чего конвекция Марангони прекращается. Через некоторый промежуток времени диффузия ПАВ из капли и гравитационная конвекция восстанавливают первоначальное распределение. Это приводит к очередному возбуждению концентрационной конвекции. Период колебаний зависит от размера и глубины погружения источника и от вещества капли. Рост вклада сил плавучести при использовании более коротких спиртов приводит к тому, что при небольших расстояниях от источника до поверхности время восстановления факела становится меньше периода колебаний, в результате чего устанавливается стационарный режим конвективного движения. Для

пропанола и более коротких гомологов стационарное течение является единственным режимом конвекции. Показано, что различия в режимах течения, наблюдаемые в тепловом и концентрационном случаях, обусловлены разным соотношением вкладов гравитационного и поверхностного механизмов в формирование конвективного течения.

В третьей главе диссертации представлены результаты экспериментального исследования структуры и устойчивости концентрационного течения Марангони от локализованного источника массы, расположенного на межфазной поверхности, содержащей адсорбированный слой ПАВ. Эксперименты проведены в стеклянной цилиндрической кювете диаметром 180 мм и высотой 60 мм, в которую помещался слой воды высокой степени очистки высотой 40 мм. Задача исследована для одного нерастворимого и двух растворимых сурфактантов. В первом случае использовалась олеиновая кислота, которая наносилась на свободную границу слоя воды. В качестве растворимого сурфактанта были использованы ацетат и лаурат калия, члены гомологического ряда калиевых солей карбоновых кислот, результаты исследования свойств которых представлены в диссертации. Обнаружено, что поверхностная активность лаурата калия на два порядка выше, чем у каприлата калия. Показано, что равновесный слой в растворах лаурата калия формируется за времена в сто раз короче, чем в растворах каприлата калия. Источником концентрационно-капиллярного течения служил слабый водный раствор этилового спирта, вносимый на границу раздела из тонкой стальной трубки, заводимой через отверстие в дне кюветы. Эксперименты с чистой водой показали, что в отсутствие сурфактанта источник генерирует осесимметричное радиальное течение, устойчивое во всем диапазоне мощности источника, используемом в опытах. Для визуализации структуры конвективного течения в жидкость добавлялись светорассеивающие частицы. Обнаружено, что внесение любого количества олеиновой кислоты приводит к потере течением осевой симметрии. На поверхности формируется две зоны с различной структурой течения: осесимметричное радиальное течение в центре и многовихревое на периферии. Уменьшение мощности источника или увеличение поверхностной плотности сурфактанта ведет к сокращению размера внутренней зоны и увеличению зоны вихревого течения, что приводит к увеличению размера вихрей и уменьшению их количества. При большой поверхностной плотности сурфактанта зона радиального течения пропадает, и на всей поверхности остается только вихревое движение. При исследовании структуры конвективного

течения в растворах сурфактантов обнаружено, что, как и в случае нерастворимого сурфактанта, наличие молекул ПАВ на границе раздела приводит к формированию двух зон с различной структурой течения. Основное отличие от случая нерастворимого ПАВ состоит в более длительном установлении стационарного состояния после включения источника. Предложен физический механизм формирования наблюдаемой структуры течения. Наличие источника инициирует движение жидкости, что приводит к конвективному переносу молекул сурфактанта к периферии, которое будет продолжаться до тех пор, пока поверхностное давление в сжатой пленке не скомпенсирует действие со стороны течения. В результате, в центральной части, где поверхность свободна от молекул ПАВ, развивается интенсивное концентрационно-капиллярное течение, а на периферии формируется застойная зона, в пределах которой выполняется баланс касательных напряжений. Если изначальное давление в слое сурфактанта больше, чем встречное действие со стороны источника, то конвективная зона не сформируется, что наблюдается в опытах для обоих типов сурфактанта. В качестве управляющего параметра, описывающего относительный вклад обоих механизмов, в диссертации предложен параметр упругости E . Данный безразмерный параметр определяет как условия формирования конвективной зоны при достижении $E = 1$, так и положение границы между зонами в области $0 < E < 1$. Опыты показали, что вихревая структура есть результат неустойчивости радиального течения, распространяющегося в объеме под застойной зоной. Предложен физический механизм, базирующийся на существовании различных граничных условий для скорости на поверхности жидкости в области застойной зоны. Для радиального течения, сжимающего слой сурфактанта, в силу баланса касательных напряжений в застойной зоне выполняется условие прилипания. Для вихревого движения жидкости с осью вихря, перпендикулярной поверхности раздела, которое не приводит к перераспределению сурфактанта в поверхностном слое, выполняется условие проскальзывания. Такая асимметрия граничного условия ведет к различной скорости вязкой диссипации потенциальной и вихревой составляющей течения. В общем случае, если конвективное течение имеет обе составляющие, следует ожидать перераспределения энергии потока от потенциальной части, как менее энергетически выгодной, к вихревой, что приведет к перестройке всего течения под поверхностью, содержащей слой сурфактанта. С этой точки зрения количество и размер вихрей не зависят от параметров источника и сурфактанта, а есть просто результат их плотной упаковки в пределах застойной зоны.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия термокапиллярного течения с адсорбированным слоем нерастворимого сурфактанта в приближении Хеле-Шоу. Такая постановка интересна с точки зрения получения устойчивого одномерного течения на поверхности жидкости. Это позволяет провести сравнение результатов эксперимента с результатами теоретических исследований, постановка в которых предполагает наличие двумерного движения жидкости в объеме и одномерного – на поверхности жидкости. Эксперименты проводились в вертикальной ячейке Хеле-Шоу, образованной двумя стеклянными пластинами. Ширина и глубина получившейся полости составляли 16 мм и 8 мм, толщина 2,5 мм. Кювета заполнялась водой высокой степени очистки до уровня верхних кромок для создания плоской поверхности. Свет от галогеновой лампы проходил через систему сферических и цилиндрических линз, формируя профиль температуры вдоль границы раздела. Температура поверхности жидкости измерялась при помощи тепловизора. Для визуализации структуры течения в жидкость добавлялось светорассеивающие частицы нейтральной плавучести. В качестве нерастворимого сурфактанта использована олеиновая кислота. Показано, что структура течения зависит от величины параметра упругости, равного отношению приращений поверхностного натяжения за счет концентрационного и термокапиллярного механизмов. В области $E > 1$, когда концентрационный механизм компенсирует действие термокапиллярного, на всей поверхности существует застойная зона с линейным профилем температуры, а в объеме и на границе развивается медленное движение. Случай $E = 0$ соответствует чистой поверхности без сурфактанта и характеризуется развитием интенсивной термокапиллярной конвекции с центром вихря вблизи холодной границы. Наиболее интересная ситуация возникает в области $0 < E < 1$, когда концентрационный механизм не может полностью скомпенсировать тепловой на всей поверхности, в результате чего вблизи горячего края появляется участок, свободный от сурфактанта, на котором развивается интенсивная термокапиллярная конвекция. Весь ПАВ сосредоточен вблизи холодного края, формируя застойную зону, в пределах которой механизмы компенсируют друг друга.

Температурный профиль представляет собой два линейных участка с разным наклоном, что обусловлено различными по интенсивности механизмами переноса тепла: конвективным на чистой поверхности и преимущественно теплопроводным в области застойной зоны. Излом профиля соответствует положению застойной точки, границы

между зонами. Рассмотрен случай $E > 1$. Исследована эволюция скорости на поверхности с момента включения источника тепла. Обнаружено, что после короткого периода, в течение которого происходит перераспределение молекул сурфактанта конвективным движением и достижение баланса касательных напряжений, на поверхности устанавливается равновесная скорость, величина которой зависит от поверхностной концентрации ПАВ. Наличие ненулевой скорости на границе раздела в условиях баланса касательных напряжений обусловлено механизмом поверхностной диффузии, размывающим неоднородное распределение молекул ПАВ. Показано, что измерение равновесной скорости на поверхности может быть применено для расчета коэффициента поверхностной диффузии.

Приведены результаты исследования положения застойной точки в области $0 < E < 1$. Показано, что по мере увеличения параметра упругости положение границы между зонами сдвигается к холодному краю кюветы. Показано, что это связано с формированием вблизи холодного края участка слоя в жидкорасширенном фазовом состоянии, размер которого растет по мере уменьшения параметра упругости. При $E = 1$ невозможно существование линейного участка при данной начальной концентрации сурфактанта.

Замечания к главе 4:

Вызывают сомнения утверждения на стр. 132-134 в диссертации и на стр. 19 в автореферате, что “Свет от галогеновой лампы проходил через систему сферических и цилиндрических линз, формируя линейный профиль температуры вдоль границы раздела.” “Максимальный перепад температуры на неподвижной поверхности воды составлял 12 К”. В этих условиях гарантировано быстрое развитие термокапиллярного течения и появление S – образного распределения температуры вдоль поверхности.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию устойчивости плоского горизонтального слоя со свободной верхней границей при наличии наклонного градиента температуры. Описана экспериментальная установка и методики измерений. Слой силиконового масла, толщина которого варьировалась в диапазоне от 1.00 до 6.00 мм, помещался в латунную прямоугольную кювету 1 с внутренними горизонтальными размерами полости $135 \times 135 \text{ мм}^2$. Над свободной поверхностью жидкости находился тонкий слой воздуха толщиной 0,5 мм, ограниченный сверху прозрачной пластиной из сапфира. На верхней и нижней границах продольные градиенты температуры создавались за счет прокачки термостатированной воды в торцевых полостях

теплообменников. Величина горизонтального градиента на обеих границах всегда задавалась одинаковой и была использована для вычисления горизонтального числа Марангони Ma_{Γ} . Для создания вертикальной составляющей температурного градиента сапфировая пластина охлаждалась относительно нижней границы на величину одинаковую для каждой продольной координаты. Рассчитанный в режиме теплопроводности перепад температуры на слое жидкости, был использован для вычисления вертикального числа Марангони $Ma_{\text{В}}$. Наблюдения структуры конвективного течения производились через сапфировую пластину при помощи тепловизора. Для визуализации структуры в объеме в жидкость добавлялось небольшое количество светорассеивающих частиц. Вертикальный профиль температуры в слое жидкости измерялся подвижной термопарой только в центральном по длине слоя сечении. В экспериментах независимо задавались оба числа Марангони, а также динамическое число Бонда, показывающее относительный вклад гравитационного и термокапиллярного механизмов конвекции. Показано, что структура конвективного течения зависит от всех трех безразмерных параметров. Построены карты режимов течения. Без выхолаживания сверху наблюдается двумерное стационарное термокапиллярное течение (ТТ). В случае только вертикального градиента температуры и превышении вертикальным числом Марангони критического значения $Ma_{\text{В}} \approx 80$ слой теряет механическое равновесие, в результате чего формируется конвективная структура в виде гексагональных ячеек с длиной волны $\lambda \approx 3d$. В общем случае, когда оба числа Марангони не равны нулю, сценарий зависит от Bo . Определены области существования течения в виде дрейфующих ячеек Бенара-Марангони, вытянутых в направлении движения; структуры в виде продольных валов, проникающих на всю глубину слоя; при больших продольных градиентах температуры реализуется режим ТТ. Наличие продольного градиента температуры оказывает стабилизирующее влияние на подогреваемый снизу слой: критическое значение $Ma_{\text{В}}$ для возникновения неустойчивости Бенара-Марангони увеличивается на порядок при $Ma_{\Gamma} \approx 150$. При увеличении числа Бонда в области больших Ma_{Γ} режим дрейфующих ячеек (ДЯ) сменяется новым типом неустойчивости в виде продольных валов или дрейфующих ячеек, но с меньшей длиной волны $\lambda \approx d$. Анализ течения в объеме показал, что данные структуры существуют в пределах термокапиллярного течения, в то время как возвратная часть течения остается устойчивой, несмотря на наличие вертикального градиента температуры. Данные типы течения названы поверхностными дрейфующими ячейками (ПДЯ) и поверх-

ностными продольными валами (ППВ). Измерения температуры в слое показали, что наличие продольного термокапиллярного течения существенно искажает вертикальный профиль. На границе области существования режимов ДЯ и ПДЯ верхняя часть возвратного течения становится устойчиво стратифицированной. Возле нижней границы неустойчивая стратификация сохраняется, но локальное число Рэлея оказывается меньше критического, что делает невозможным развитие неустойчивости. В области термокапиллярного течения стратификация плотности неустойчивая. Оценки локального вертикального числа Марангони для приповерхностной области показывают превышение порогового значения, необходимого для развития неустойчивости Бенара-Марангони. Таким образом, в толстых слоях жидкости, соответствующих большим значениям чисел Бонда Bo , искажение профиля температуры термокапиллярным течением приводит к вытеснению неустойчивости Бенара-Марангони в область поверхностного течения. В тонких слоях толщина поверхностной части течения оказывается недостаточной для развития неустойчивости, в результате чего весь слой становится устойчивым при увеличении Ma_{Γ} . Результаты исследования пространственно-временных характеристик ПДЯ показывают уменьшение длины волны и увеличение скорости дрейфа ячеек при увеличении Ma_{Γ} , что хорошо согласуется с предложенным физическим механизмом формирования наблюдаемой неустойчивости. Обнаружено, что ДЯ, в отличие от ПДЯ, могут менять направление дрейфа в зависимости от безразмерных параметров задачи, что обусловлено разным взаимодействием ячеек с поверхностной и возвратной частями течения при изменении глубины их проникновения в слой.

Замечания к главе 5:

1. Возникает вопрос по методике: как учтены коэффициенты поглощения сапфира и как они влияют на точность измерения тепловизором температуры на нижней границе сапфировой пластины и на поверхности жидкости? Результаты измерений количественные или качественные?
2. Не указано, какое силиконовое масло использовано в экспериментах и насколько сильно зависят его свойства от температуры.
3. Насколько корректна процедура измерений градиента температуры по нормали к нижней границе? Даже при тонкой газовой прослойке над свободной поверхностью, по-видимому, необходимо определять коэффициент теплоотдачи со свободной поверхности и его роль в экспериментах со слоями различной толщины.

4. Насколько сильно может повлиять на течение радиальная неоднородность температуры из-за того что цилиндрическая сапфировая верхняя граница существенно меньше чем нижняя латунная поверхность?

Шестая глава посвящена изучению явления аккумуляции твердых включений тепловой конвекцией Марангони в жидком мостике (модель метода БЗП). Приведено описание экспериментальной установки и методик измерения. Жидкий мостик создавался между двумя соосными цилиндрами радиусом $R = 3$ мм, расстояние между которыми L задавало аспектное соотношение $A = L/R$. Верхний цилиндр изготовлен из сапфира, что позволяло наблюдать структуру течения в аксиальном направлении. Материал нижнего цилиндра и конструкция верхнего и нижнего теплообменников зависели от используемой жидкости. Эксперименты проведены с *n*-деканом и смесью расплавов нитрата натрия и нитрата цезия (рабочая температура 350°C). В случае *n*-декана нижний цилиндр изготавливался из латуни, а разность температур между цилиндрами создавалась при помощи двух водяных термостатов. При использовании расплава цилиндр был изготовлен из графита, а температура цилиндров задавалась электрическими нагревателями. Близкие физико-химические свойства расплавов этих веществ позволяли менять плотность расплава при изменении их относительного содержания, оставляя при этом неизменной величину числа Марангони. Представлены результаты исследования формы, области существования и условий формирования аккумуляционных структур (АС). По результатам синхронизированных наблюдений с двух направлений сделана 3D реконструкция АС. Обнаружено, что структура представляет собой одномерный объект в виде замкнутой линии спиралевидной формы, оборачивающейся вокруг основного тороидального конвективного вихря целое число раз, что определяет азимутальное волновое число АС. Часть структуры существует на поверхности, а часть – в возвратном течении. Построены карты режимов течения в координатах. Обнаружено, что область существования АС всегда расположена внутри зоны существования колебательного режима конвекции в виде гидротермической волны с тем же азимутальным волновым числом, т.е. наличие такого типа течения является необходимым условием для формирования АС. Представлены результаты исследования процесса формирования АС в зависимости от свойств частиц. Показано, что в случае разной плотности материала частиц и жидкости зависимость времени формирования от размера частиц носит немонотонный характер. Показано, что нейтрально плавучие частицы формируют АС быстрее всего.

Представлены результаты экспериментов, проведенных в условиях микрогравитации на борту беспилотной исследовательской ракеты, совершающей суборбитальный полет по баллистической траектории. Описаны особенности экспериментальной установки и методик проведения измерений. Показано, что в условиях микрогравитации АС, наблюдаемая для частиц с плотностью, отличной от плотности жидкости, формируется несколько быстрее, что связано с отсутствием седиментационных эффектов.

Представлены результаты исследования влияния поверхностно-активной примеси на структуру термокапиллярного течения и формирование АС. Обнаружено, что наличие сурфактанта в жидком мостике приводит к формированию в надкритической области течения в виде стоячей волны, т.е. суперпозиции двух бегущих волн противоположного направления. Данные наблюдения позволили объяснить противоречия в результатах, полученных ранее в теоретических и экспериментальных исследованиях.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы

Сделанные выше замечания по главам вовсе не исключают общую положительную оценку работы в целом. В целом диссертация Мизева Алексея Ивановича - завершённый этап научных исследований, выполненных на высоком методическом уровне. Работа хорошо оформлена с использованием современных средств, написана на высоком профессиональном уровне. Список публикаций по теме диссертации состоит из 68 печатных работ, из них 13 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов докторских диссертаций, 13 статей в сборниках статей и трудах конференций и 42 публикации в тезисах конференций. в них достаточно полно отражены основные результаты диссертации. Результаты диссертационного исследования докладывались на многочисленных научных конференциях и семинарах

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертация Мизева Алексея Ивановича является оригинальной, завершённой научно-квалификационной работой, в которой наиболее важными являются новые научные результаты исследований влияния поверхностно активных веществ на характеристики течений изотермических и неизотермических жидкостей в слоях со свободными границами, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области технологической гидродинамики. Считаю, что диссер-

тация Мизева А.И. по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и их научно-практической значимости удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с п.9 “Положения о порядке присуждения ученых степеней”, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации, а сам Мизев Алексей Иванович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник федерального
государственного бюджетного учреждения
науки «Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН»
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева д.1
тел. +7 (383) 316-53-32, e-mail: berdnikov@itp.ncs.ru

/Бердников Владимир Степанович/

29 января 2019 г.

Подпись В.С. Бердникова удостоверяю:

Ученый секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н.

/М.С. Макаров/

