

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Воробьева Максима Александровича «Влияние дисперсной фазы на локальную структуру и теплообмен пузырьковых течений в области малых газосодержаний», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

В настоящее время изучение газожидкостного потока в каналах различной направленности имеет немаловажное значение в связи с необходимостью осуществления расчетов параметров течений жидкости, газа или их смесей при наличии осложняющих факторов при решении различных технических и/или технологических задач энергетики, химической и нефтегазодобывающей промышленности. Необходимо совершенствование методов исследования газожидкостного потока, выявление особенностей гидродинамических и теплообменных процессов, сопровождающих транспорт двухфазной системы «жидкость – газ» по каналам при различных режимах течения, создание эффективных методик расчета характеристик двухфазного потока и их применение к проблематике транспортировки газожидкостных смесей. При транспорте двухфазной системы «жидкость – газ» по каналам в зависимости от различных параметров (расходы фаз, геометрия канала, направленность потока и т.п.) возникают разные режимы течения газожидкостной смеси. При изучении газожидкостных течений возникает ряд проблемных задач, для решения которых до сегодняшнего дня нет удовлетворительных теоретических подходов. Это касается, в частности, задачи распределения газовой фазы по сечению канала, а также влияния дисперсной фазы на локальную структуру и теплообмен. В этой связи диссертационная работа Воробьева М.А., направленная на детальное изучение процессов, происходящих при течении газожидкостной смеси в канале, анализ факторов, влияющих на локальные характеристики газожидкостного потока и его теплообмен при малых газосодержаниях, включая процессы генерации пузырьковой смеси, обладает, несомненно, **научной и практической**

значимостью. Экспериментальное исследование формирования дисперсной газовой фазы на капилляре и режимов генерации пузырьков в потоке жидкости, системное изучение нисходящего пузырькового течения газожидкостной смеси определяет **актуальность** представленной к защите работы.

Соискателем определены режимы формирования пузырьков на одиночном капилляре в потоке жидкости. Получены экспериментальные данные о локальной структуре опускного пузырькового течения вблизи режима зависания газовой фазы и при докритических числах Рейнольдса жидкой фазы. В диссертации Воробьева М.А. проведено экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик пузырькового течения газожидкостной смеси в сборке вертикальных стержней. Показано влияние распределения газовой фазы по сечению канала на структуру течения. Из вышесказанного следует **соответствие** диссертации паспорту специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

В диссертационной работе Воробьева М.А. получены **новые научные результаты.** Экспериментальным путем изучено влияние расходных характеристик фаз, направления течения и ориентации капилляра в потоке на процесс формирования пузырьков на одиночном капилляре в потоке жидкости; определены режимы отрыва пузыря от капилляра, среди них выделены режимы, наиболее пригодные для создания монодисперсных газожидкостных смесей. Показано, что при расходе газа, не превышающем критического значения, диаметр капилляра и свойства жидкости оказывают существенное влияние на характер зависимости среднего объема пузыря от расходов фаз. При изучении нисходящего пузырькового течения газожидкостной смеси установлено, что относительные пульсации напряжения трения вблизи режима зависания газовой фазы больше на 20% аналогичных параметров однофазного течения жидкости. Также показано, что при докритических числах Рейнольдса жидкой фазы для опускного пузырькового течения основным механизмом, определяющим деформацию профилей скорости жидкости, является изменение распределения напряжения трения по сечению трубы, вызванное дифференциальной плавучестью из-за неравномерного распределения газовой фазы по сечению. При этом, адекватным масштабом для псевдотурбулентных

пульсаций скорости жидкости является динамическая скорость, вычисляемая по измеренным значениям напряжения трения на стенке канала. При экспериментальном исследовании газожидкостного потока в сборке вертикальных стержней установлено, что вклад газовой фазы в интенсификацию теплообмена возрастает при уменьшении числа Рейнольдса и удалении от дистанцирующей решетки. Величины напряжения трения и пульсаций напряжения трения на поверхности центрального стержня сборки существенно возрастают при введении в поток жидкости газовой фазы, при этом их зависимости от расстояния до дистанцирующей решетки имеют немонотонный характер. Впервые показано, что распределение газовой фазы по сечению канала не имеет аксиальной симметрии: вблизи решетки профили газосодержания в ячейке сборки имеют куполообразный профиль, а при удалении от нее профили постепенно перестраиваются к седлообразному виду, когда концентрация пузырьков максимальна вблизи стенок стержней.

Экспериментальное исследование изучаемых в диссертации явлений осуществлено на базе современных методов измерения параметров газожидкостных потоков. **Обоснованность и достоверность** результатов работы подтверждаются использованием апробированных методик проведения экспериментов, проведением калибровочных экспериментов и оценкой величины погрешности измерений, а так же сопоставлением полученных результатов с известными корреляциями.

Научная и практическая ценность диссертации обусловлена, прежде всего, важностью практических приложений, послуживших мотивацией для экспериментального изучения гидродинамических структур и теплообмена газожидкостных потоков. Полученные экспериментальные данные о режимах генерации пузырьков, важны для оптимизации работы таких технических приложений, как абсорбционные насосы и биореакторы пузырькового типа, где размер газовых включений существенно влияет на процесс массообмена. Экспериментальные данные о параметрах нисходящего пузырькового течения газожидкостной смеси при докритических числах Рейнольдса и вблизи режима зависания газовой фазы дополняют знания о такого рода течениях и могут быть использованы для верификации расчетных моделей. Экспериментальные

данные о локальных характеристиках пузырьковых течений в вертикальной сборке стержней позволяют улучшить понимание механизмов влияния газовой фазы на теплогидравлические параметры течения и заслуживают упоминания в учебных курсах по механики многофазных сред. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для совершенствования специализированных программных продуктов для расчета параметров газожидкостного течения в скважинах и трубопроводах, для выбора наиболее эффективных методов управления тепломассопереносом в двухфазных потоках.

В качестве **замечаний** хотелось бы высказать следующее:

1. В работе флюиды подавались в экспериментальную установку при помощи центробежного насоса, при этом никак не оговаривается возможное влияние пульсаций расхода насоса на изучаемые в диссертации процессы и их характеристики, особенно в области неустойчивых режимов течения газожидкостной смеси, при существенной роли коалесценции пузырьков и т.п.

2. Соискателем не описан способ удержания режима зависания газовой фазы в нисходящем пузырьковом течении газожидкостной смеси без кумуляции газовой фазы в верхней части рабочего канала экспериментальной установки.

3. Вывод соотношения (4.4) для вычисления истинного газосодержания по данным измерения напряжения трения и перепада давления на манометре недостаточно, на мой взгляд, обоснован. При выводе соотношения (4.4) не учтена сила межфазного трения между жидкостью и пузырьками газа, а также уменьшение истинной площади жидкой фазы при вычислении гидродинамической силы, связанной с перепадом давления. В режиме зависания межфазное трение компенсируется подъемной архимедовой силой, действующей на пузырьки, которая в случае высокого газосодержания может быть не мала.

4. Для ряда практически интересных приложений было бы целесообразно иметь информацию не только о профилях локального газосодержания, но и о профилях гистограммы распределения газовых пузырьков по размерам (в случае полидисперсной газожидкостной смеси). Также стоит отметить, что данное замечание можно рассматривать с позиции пожеланий для дальнейшего

развития исследований.

5. Диссертация не свободна от опечаток, орфографических и смысловых погрешностей (например, «...силу поверхностного натяжения необходимо умножать на так называемый коэффициент ...» и т.п.). Не совсем корректно сформулирован четвертый вывод, в котором указано, что «... Для восходящих пузырьковых адиабатических потоков ... получены данные о: теплообмене стержней сборки с пузырьковым потоком ...». В списке литературы диссертации под номерами 180, 181 и 220 приведены лишь англоязычные версии переводных статей соискателя. На мой взгляд, следовало бы привести статьи на языке оригинала, а при необходимости добавить англоязычную версию.

Сделанные замечания не влияют на общую оценку работы, которая заключается в следующем.

Материалы диссертационной работы докладывались на международных и российских научных конференциях, опубликованы в научных статьях, в том числе в рецензируемых научных журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Текст автореферата в полной мере отражает содержание объема выполненных исследований, представленных в диссертационной работе. Работа хорошо оформлена и иллюстрирована, изложение содержания логически последовательно и методологически верно отражает суть работы. Результаты диссертационного исследования имеют значимую научную и практическую новизну и показывают высокий научный уровень соискателя.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Воробьева Максима Александровича на тему «Влияние дисперсной фазы на локальную структуру и теплообмен пузырьковых течений в области малых газосодержаний», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся решения задачи, имеющей важное значение для научного обоснования технологий и технических устройств, в которых реализуются газожидкостные течения. Диссертационная работа соответствует

пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Воробьев Максим Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Я, Мусакаев Наиль Габсалимович, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Воробьева Максима Александровича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
директор ТюмФ ИТПМ СО РАН,
доктор физико-математических наук (специальность 01.02.05. Механика жидкости, газа и плазмы), профессор



Мусакаев Наиль Габсалимович

22.05.2023 г.

Тюменский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ТюмФ ИТПМ СО РАН)

Адрес: 625026, г. Тюмень, а/я 1507, ТюмФ ИТПМ СО РАН,

телефон: +7(3452) 68-27-45,

адрес электронной почты: musakaev@ikz.ru

Подпись д.ф.-м.н., профессора Мусакаева Н.Г. удостоверяю
Ученый секретарь ТюмФ ИТПМ СО РАН.
к.ф.-м.н.



Бородин С.Л.