

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Воробьёва Максима Александровича «Влияние дисперсной фазы на локальную структуру и теплообмен пузырьковых течений в области малых газосодержаний», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Актуальность темы. Пузырьковые двухфазные течения реализуются и используются во многих производствах и технологических процессах. Важную роль такие течения играют в ядерных энергетических технологиях, использующих жидкий теплоноситель, в том числе и металлический. Двухфазность здесь проявляется и в нормальных, и в аварийных режимах в связи с кипением теплоносителя, либо с межконтурными течами (металлический теплоноситель). Наличие газовой фазы существенно сказывается на параметрах потока, в частности, на гидравлическом сопротивлении и теплообмене. В то же время общая методика описания и прогнозирования характеристик таких течений в широком диапазоне условий сегодня отсутствует. Имеется дефицит экспериментальных данных, касающихся опускных течений с малыми расходами фаз, с малыми числами Рейнольдса жидкости и вблизи режима остановки газовой фазы. Недостаточно также данных по детальной структуре пузырькового потока в стержневых пучках. Работа автора в существенной мере восполняет этот пробел, и поэтому она является востребованной и актуальной.

Содержание работы. Автором сделан подробный и качественный обзор сегодняшнего состояния исследований по пузырьковым течениям. Это позволило выявить области, где имеется недостаток экспериментальной информации (глава 1).

Описание методов измерения разных параметров течения – расходов фаз, размеров пузырьков, скорости жидкости, пульсаций скорости, напряжения трения на стенках, температуры, интенсивности теплообмена – приводится в главе 2. Положительным моментом является то, что это описание сопровождается сведениями о калибровке методик и оценкой измерительной погрешности для каждой из измеряемых величин. Это позволяет оценить достоверность сделанных автором выводов.

Для надёжного контроля размеров пузырей, вводимых в поток в разных условиях, автор проделал специальную работу по исследованию процесса формирования пузырьков на выходе из капилляра в восходящем и опускном потоках с разными расходами, с различными положениями конца капилляра в канале и разными направлениями выхода газа относительно потока жидкости (глава 3). Эти данные используются автором в дальнейших исследованиях.

Исследуя опускные пузырьковые потоки в трубах и каналах при малых числах Рейнольдса и вблизи режима остановки газовой фазы, автор установил, что введение в поток даже небольшого расхода газа существенно влияет на характеристики течения, такие, как профиль скорости жидкости, напряжение трения у стенки. При этом трение оказывается значительно выше, чем в однофазном потоке жидкости (глава 4). Наличие и движение пузырьков приводит, как показано автором, к появлению пульсаций скорости в потоке даже при докритических числах Рейнольдса.

Проведённое автором исследование пузырькового течения в стержневых пучках с дистанцирующими решётками показало, что небольшой расход газовой фазы приводит к интенсификации теплообмена со стержнями по сравнению с однофазной жидкостью (глава 5). При этом число Нуссельта как функция расстояния до решётки ведёт себя совершенно иначе, чем в однофазной жидкости.

Научная новизна. Многие результаты работы являются новыми и получены впервые. Впервые для опускных пузырьковых течений экспериментально измерены важные локальные характеристики, в том числе, пульсации скорости, возникающие даже при докритических числах Рейнольдса. В стержневых пучках в двухфазном потоке впервые измерены напряжения на стенках стержней, измерены коэффициенты теплоотдачи к стержням. Установлено, что зависимость этих параметров от расстояния до дистанцирующих элементов резко отличается от зависимости в однофазной жидкости.

Практическая значимость. Полученные автором результаты имеют научное и практическое значение в частности, с точки зрения теплогидравлики ядерных энергетических установок. Так, пузырьковые режимы течения теплоносителя могут реализоваться при его закипании. Опускные двухфазные потоки, в том числе с малыми расходами, могут возникать при межконтурных течах в парогенераторе проектируемой реакторной установки нового поколения со свинцовым теплоносителем. Изученные автором закономерности подобных течений представляют ценный материал для верификации расчётных кодов, применяемых для обоснования безопасности АЭС.

Достоверность результатов. Из текста автореферата видно, что автор много внимания уделяет калибровке измерительных средств, тестированию методик на хорошо изученных однофазных течениях, анализу погрешностей измерений, воспроизводимости результатов. Достоверность выводов автора не вызывает сомнений.

Апробация работы. Результаты, представленные в работе, многократно докладывались и обсуждались на различных международных и российских конференциях и семинарах. По материалам работы опубликовано 36 работ, включая 12 статей в журналах, входящих перечень изданий, рекомендованных ВАК:

Замечания. 1. В тексте реферата нигде не указано, как вводилась в поток газовая фаза в экспериментах, описанных в главах 4 и 5 (положение источника газа, его ориентация относительно потока). В тексте нет комментариев о том, как могли бы измениться результаты, если бы пузырьки появлялись на стенках при кипении.

2. Эксперименты по стержневым пучкам проведены с квадратной упаковкой стержней. Гораздо больший интерес представляли бы данные по пучкам с треугольной упаковкой, характерной для активных зон отечественных реакторных установок.

3. На рис. 2 неудачно расположены обозначения осей и шкалы откладываемых величин. На рис. 5 не указано, чему соответствуют точки, обозначенные разными символами. На рис. 6 перепутаны обозначения частей рисунка «в» и «г».

Несмотря на отмеченные недостатки, считаю, что работа заслуживает высокой оценки. Это законченная научная работа хорошего уровня. Ее результаты восполняют недостаток данных, касающихся относительно слабо изученных особенностей пузырьковых течений в трубах и стержневых пучках. Содержание работы соответствует паспорту специальности.

На основании изложенного считаю, что диссертация М.А. Воробьева. удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по заявленной специальности и полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней». М.А. Воробьев заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Заместитель заведующего отделением ИБРАЭ РАН д.ф.-м.н.

Семенов

Семенов Владимир Николаевич

11.05.2023

Адр.: 115191, Москва, Б. Тульская, 52.

Тел.: 8 (495) 955-22-59, эл. почта: sem@ibrae.ac.ru.

Подпись В.Н. Семенова удостоверяю.

Ученый секретарь ИБРАЭ РАН к.т.н.



В.Е. Калантаров
В.Е. Калантаров