

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Рандина Вячеслава Валерьевича
"Гидродинамическая структура и теплообмен двухфазных газожидкостных потоков", представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05-механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию гидродинамики и теплообмена двухфазных газожидкостных потоков. Такие течения встречаются в целом ряде промышленных установок в химической и микробиологической промышленности, в энергетике, а также при совместном сборе и транспорте нефти и газа. Многообразие режимов течения существенно усложняет теоретическое предсказание гидродинамики двухфазного потока, требуя использования многочисленных гипотез, предположений и приближений. Нередко сложность структуры течения делает невозможным чисто теоретическое описание его поведения и требует использования эмпирических данных. Поэтому экспериментальное изучение газожидкостных потоков является **крайне актуальным**.

В **первой главе** приводится детальный обзор теоретических и экспериментальных исследований гидродинамики пузырьковых газожидкостных течений, а также методов их диагностики. Справедливо отмечается, что выполненные ранее работы характеризуются недостаточно подробным описанием пристенной области течения, которая существенно влияет на процессы турбулентного переноса. В литературе отсутствуют также систематические и подробные экспериментальные данные по опускному пузырьковому течению, которое из-за своей симметричности наиболее привлекательно при построении теоретических моделей.

Вторая глава посвящена описанию особенностям методики измерений. В ней приводится краткое описание используемых экспериментальных методов исследования и особенности измерения различных характеристик газожидкостных потоков (диаметр газовых пузырей, скорость жидкости, локальное газосодержание, трение и др.). Глубокая проработка методических вопросов свидетельствует о высокой достоверности результатов измерений, описанных в последующих главах.

В **третьей главе** приводятся результаты исследования структуры потока и гидродинамических характеристик опускного пузырькового течения в вертикальной трубе в турбулентном режиме. Параметры опускного двухфазного течения исследовались при разных значениях приведенных скоростей жидкости и газа. Эксперименты проводились

для различных диаметров газовых пузырей. Во всех исследованных режимах реализовывалось спутное опускное пузырьковое течение.

Получен целый ряд оригинальных результатов, определяющих **научную новизну** диссертации: выявлена существенная деформация профиля осредненной скорости жидкости с образованием максимумов вблизи стенки трубы даже при относительно малых добавках газовой фазы; обнаружен эффект подавления турбулентных пульсаций скорости жидкости в пристенной области и др.

В **четвертой главе** рассматривается опускное пузырьковое течение при докритических числах Рейнольдса. С целью получения малых чисел Рейнольдса при умеренных скоростях жидкой фазы необходимо повысить вязкость жидкости. Для повышения вязкости в рабочую жидкость был добавлен глицерин (весовая концентрация глицерина равнялась 57%). Отметим, этот прием позволил увеличить вязкость в пять раз по сравнению с водой. Эксперименты проводились при разных значениях приведенной скорости жидкости и объемного расхода газосодержания. При всех режимных параметрах потока однофазное течение было ламинарным.

Среди новых результатов можно выделить: обнаружен слой жидкости, свободный от пузырей газа, и зависимость его толщины от параметров течения; выявлены причины деформации профиля скорости жидкости; получены новые данные, касающиеся наведенной пузырями турбулентности.

Пятая глава посвящена исследованию структуры восходящего снарядного течения в вертикальной трубе. При обработке результатов измерений использовался метод условного осреднения. Поток осреднялся отдельно в жидких пробках и в жидких пленках вокруг газовых снарядов. Измерения проводились при разных приведенных скоростях жидкости и объемных расходах газосодержаний.

Получен ряд интересных результатов: обнаружено уменьшение трения по мере удаления от носика снаряда вплоть до отрицательных значений; выявлено увеличение интенсивности пульсаций трения вблизи донышка снаряда из-за возмущающего действия образующегося вихря; обнаружен тороидальный вихрь, формирующийся в начальном участке жидкой пробки.

В **шестой главе** приводятся данные по исследованию гидродинамики и теплообмена пузырькового течения в наклонном плоском канале. Эксперименты проводились при разных приведенных скоростях жидкости и объемных расходах газосодержаний. Во всех исследованных режимах поток оставался пузырьковым. Визуальные наблюдения показали, что распределение пузырей по сечению канала стабилизируется уже на расстоянии 200 мм от места ввода газовой фазы в поток. Кроме того, проводились

эксперименты, в которых расстояние от места ввода газа до измерительного участка было равно 450 мм. Отчетливо показано, что дальнейшее увеличение расстояния от генератора пузырей до измерительного участка не оказывает влияния на результаты измерений.

Среди новых результатов можно выделить: выявлено существенное влияние угла наклона канала на трение и теплообмен; обнаружено влияние приведенной скорости жидкости на трение и теплообмен; установлено граничное значение объемного расходного газосодержания, при котором отсутствует коалесценция пузырей.

По результатам каждой главы сделаны выводы, подчеркивающие наиболее важные и новые результаты, а также сформулированы общие выводы по диссертации. Обоснованность выводов диссертации не вызывает сомнения. Полученные результаты по исследованию различных аспектов газожидкостных течений находятся в согласии друг с другом, формируя цельную и непротиворечивую картину.

По содержанию диссертации можно высказать следующие замечания:

1. Диссертация содержит колоссальное количество новых экспериментальных данных, однако, их обобщение (систематизация) с использованием безразмерных критериев (параметров), путем построения карт режимов и т.п. практически отсутствует.
2. В работе незаслуженно мало уделено такой характеристике как относительная скорость между фазами (скорость всплытия пузырей). Простые оценки особенностей движения пузырей с привлечением известных безразмерных критериев украсили бы имеющиеся уникальные экспериментальные данные.
3. В работе в основном изучаются турбулентные течения, однако не приведены величины пространственных макро- и микромасштабов турбулентности несущей жидкости и не проведено их сравнения с диаметрами пузырей.
4. Автор пишет (с.70 диссертации): «Расход жидкости в щели был постоянным в течение конкретного эксперимента, что позволяло, меняя расход в щели, получать пузыри фиксированного размера». Не понятно, что имеется в виду? По-видимому, изменялся расход газа! В связи с этим полезно было привести рабочую характеристику газожидкостного смесителя, приведенного на рис. 3.2 (с.69 диссертации).
5. Учитывая исключительную важность действующих на частицу силовых факторов (поперечная сила из-за градиента скорости, отталкивающая сила, сила Архимеда и др.) полезно сделать оценки их величин для различных экспериментальных режимов.
6. На рис. 2.13 (с.64 диссертации) значения объемного газосодержания содержат три значащие цифры, что, по-видимому, существенно перекрывает погрешность измерения указанной характеристики.

7. Из рис. 2.13 (с.64 диссертации) следует, что пузыри являются существенно полидисперсными (различие в размерах достигает 4-5 раз). Этому обстоятельству в диссертации уделено незаслуженно мало влияния.

Приведенные замечания носят характер рекомендаций и не снижают общую высокую оценку работы. Диссертация Рандина Вячеслава Валерьевича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой экспериментально исследованы фундаментальные явления, определяющие гидродинамику и теплообмен двухфазных газожидкостных потоков. Проведенный автором анализ результатов способствует углублению понимания физики сложного взаимодействия газовых пузырьков с турбулентным потоком несущей жидкости и закладывает базу для развития новых, физически обоснованных теоретических моделей, что можно квалифицировать как научное достижение в области исследования многофазных течений. Все основные результаты работы опубликованы, преимущественно в журналах из перечня ВАК, а также в трудах международных конференций. Автореферат диссертации адекватно отражает содержание и основные выводы работы.

Диссертация Рандина Вячеслава Валерьевича «Гидродинамическая структура и теплообмен двухфазных газожидкостных потоков», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Рандин Вячеслав Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией ОИВТ РАН,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.



А.Ю. Вараксин

Сведения о составителе отзыва:

Вараксин Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН; почтовый адрес: 111558, Москва, Федеративный пр-т, д.38, к.1, кв.61; адрес электронной почты: varaksin_a@mail.ru; наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН); должность: заведующий отделом.

Подпись А.Ю. Вараксина заверяю

Ученый секретарь ОИВТ РАН,
д.ф.-м.н.



Р.Х. Амиров

Адрес организации: 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13 стр.2, тел.: +7(495)4858345