

На правах рукописи

Омар Хассан

**Структура и газосодержание в двухфазной смеси при
барботажных режимах в трубах**

01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Автор:

Москва-2007

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Похвалов Юрий Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических
наук, профессор
Борисевич Валентин Дмитриевич

доктор технических наук,
главный научный сотрудник
Институт высоких температур РАН
Зейгарник Юрий Альбертович

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский
институт атомного машиностроения.

Защита состоится " 16 " мая 2007 г. в ____ час. ____ мин. на
заседании диссертационного совета Д212.130.04 в МИФИ по адресу: 115409,
Москва, Каширское шоссе, д.31, тел.324-84-98, 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан " " 2007 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор

Е.М. Кудрявцев

Актуальность темы

Под барботажным режимом в трубе понимается расход и подъём газовой фазы в жидкости, когда расходная скорость направленного движения жидкости отсутствует. Барботажный режим может встречаться в парогенераторах АЭС, кипящих реакторах, испарителях, при внештатных и аварийных режимах в трубопроводах энергооборудования, а также во многих других аппаратах. Большинство исследований проведено по изучению барботажного режима в колоннах большого диаметра. Гидродинамика барботажных режимов в трубах небольшого диаметра существенно отличается от таковой при барботаже в колоннах. По сравнению с вынужденным газожидкостным течением барботажный режим при равных приведенных скоростях газа (или скоростях смеси) характеризуется наибольшим истинным газосодержанием и является предельной границей возможных вынужденных режимов. Кроме того, барботажный режим характеризуется наиболее ранним переходом от пузырьковой к снарядной структуре течения. Изучение барботажных режимов в трубах небольшого диаметра практически не проводилось. Отсутствуют данные об истинных газосодержаниях и распределениях локального газосодержания по сечению трубы. Недостаточно изучена снарядная структура при барботажном режиме.

Снарядный режим характеризуется движением в жидкости крупных газовых пузырей, имеющих снарядообразную форму, поперечные размеры которых соизмеримы с поперечным сечением канала, а длина снарядов может достигать нескольких диаметров трубы. От стенки снаряды газа отделены слоем текущей жидкости, а друг от друга – жидкостной пробкой, содержащейся газовая фаза в виде пузырьков. При снарядном режиме течения пароводяной смеси в каналах энергоустановок наблюдаются крупномасштабные пульсации давления, температуры стенки канала, скоростей течения фаз, возможно развитие колебательных процессов в системе, наступление кризиса теплообмена при кипении или усталостные разрушения материала каналов.

Для того, чтобы характеризовать снарядное течение, были предложены различные модели. Однако, из-за сложной структуры снарядного потока и его крупномасштабного пульсационного характера, теоретические описания этого течения не развиты. Поэтому выполнение экспериментальных исследований становится весьма необходимым, чтобы обеспечить достаточную информацию для развития надежных вычислительных моделей

Цель работы

Основной целью работы является исследование гидродинамики и структуры двухфазного потока при барботажном режиме в трубах. В частности, в ходе реализации цели работы решались следующие основные задачи:

- исследование связи истинного среднего газосодержания и режимного фактора барботажного режима (приведенной скорости газа).
- предложение расчётного соотношения, описывающего связь истинного газосодержания и режимного фактора барботажного режима.
- исследование распределения локального (вероятностного) газосодержания по радиусу канала и зависимость его от режимного фактора барботажного режима.
- установление зависимостей пространственных и временных параметров снарядной структуры течения от режимного фактора (приведенной скорости газа) при барботажном режиме.
- предложение расчетного соотношения для определения газосодержания в жидкой пробке при барботажном режиме.
- предложение расчетного соотношения для определения доли времени следования снарядов.
- предложение расчётно-теоретической модели двухфазного потока при снарядном режиме течения, дающей возможность единым комплексом уравнений связать все временные, пространственные, кинематические параметры структуры снарядного потока в зависимости от режимного фактора.

Комплекс исследований, посвященный решению этих задач, выполнялся в Московском инженерно-физическом институте в период 2003-2007 гг.

Научная значимость и новизна работы

Научная значимость и новизна работы состоит в том, что при проведении экспериментов в условиях каждого единичного опыта получался большой массив данных по истинному газосодержанию и его распределению в канале а также по всему комплексу взаимосвязанных пространственных и временных параметровДФП при барботажном режиме. Для истинного газосодержания предлагается использовать модель потока дрейфа. Созданы параметрическое описание и расчётно-теоретическая модель снарядного течения.

Совокупность эффективно работающих средств диагностики, параметрического описания ДФП, расчётно-теоретической модели и экспериментального материала по истинным газосодержаниям, его распределениям и набору характеристик структуры снарядного потока позволяют рассматривать выполненную работу как развитие перспективного научного направления исследований в теплогидравлике двухфазных потоков.

Практическая значимость работы

Полученные новые экспериментальные данные по истинным и локальным газосодержаниям, а также по структуре снарядного течения при барботажном режиме могут служить научной основой для дальнейших исследований процесса совместного течения жидкости и газа, а также создания приборов для измерения истинного газосодержания.

Выполненные исследования раскрывают физические закономерности в ДФП и дают практические инженерные рекомендации для расчёта их теплогидравлических характеристик. Эти рекомендации имеют практическое значение для проектных организаций (КБ) при разработке и анализе работы функционирующих современных теплонапряженных энергетических установок в плане повышения их эффективности, надежности и безопасности.

В равной мере результаты работы представляются ценными и для исследовательских организаций для совершенствования экспериментальной диагностики структур двухфазных течений и расчётных описаний ДФП, обладающих большой временной и пространственной неравномерностью.

Апробация работы и публикации

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на научных конференциях МИФИ (секция ядерная энергетика) в 2005, 2006 и 2007 г., на Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену (2006 г.). По результатам исследований, составившим основу диссертации, опубликовано 7 печатных работ и одна статья находится в печати.

Автор защищает

1. Экспериментальные данные по локальным и средним газосодержаниям в трубе при барботажном режиме. Данные обобщены размерными и безразмерными зависимостями и проанализированы в рамках модели потока дрейфа.

2. Экспериментальные данные по усредненным пространственным и временным параметрам структуры восходящего снарядного потока при барботажном режиме.
3. Двухстадийную модель при снарядном барботажном режиме течения, дающую возможность единым комплексом уравнений связать все временные, пространственные, кинематические параметры снарядного потока в зависимости от режимного фактора.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из пяти глав, заключения, приложения и списка литературы (138 наименований), содержит 120 страниц, 48 рисунок, 4 таблицы.

Содержание работы

Главы 1 и 2

Проведен литературный обзор двухфазной смеси. Обсуждены в частности газосодержание, модель потока дрейфа, методы моделирования ДФП. Констатируется, что количество публикаций в мире по исследованию двухфазного потока постоянно нарастает и что перспективным способом исследования ДФП является использование модельного метода, объединяющего в себе достоинства эмпирического и аналитического методов. Обсуждены методы измерения локального (вероятностного) газосодержания и среднего по сечению газосодержания, а также взаимная тарировка измерений.

Локальное газосодержание определялось резистивным методом, основанным на учете разности активных электропроводностей жидкости и газа. Этот метод весьма прост, надежен, его эффективно использовали многие исследователи. Абсолютная погрешность метода составляет $\pm 0,01$.

Для измерения среднего по сечению истинного газосодержания использовался датчик с поперечным электрическим полем. Датчик представляет собой двухэлектродную кондуктометрическую ячейку, в которой сегментные электроды расположены в соответствующих вырезах диэлектрического вкладыша. По результатам тарировок абсолютная погрешность измерений среднего газосодержания оценивается $\pm (0,01-0,02)$.

Глава 3

Представлены результаты измерения истинного объёмного осредненного по сечению канала и времени газосодержания, а также локального (вероятностного) газосодержания. Предложена расчетная

формула для определения истинного объёмного осредненного газосодержания и степенная функция для локального газосодержания. Разработана одностадийная модель для оценки ниспадающей толщины жидкой плёнки в зоне течения жидкости вблизи стенки на основе экспериментальных данных по $\langle \bar{\varphi} \rangle$ и $\bar{\varphi}(r)$.

Газосодержание является одной из самых важных характеристик, используемых для определения параметров двухфазного потока, таких как плотность и вязкость двухфазного потока, относительная средняя скорость газа и т.п. Истинное газосодержание имеет ключевое значение в моделях для того, чтобы предсказать режим течения, теплообмен, перепад давления, параметры модели потока дрейфа. Предсказание истинного газосодержания в зависимости от режимных факторов исключительно важно для физических расчётов в реакторных технологиях, в химической промышленности и газонефтяной отрасли. Результаты измерения истинного объёмного газосодержания, осредненного по сечению и времени ($\langle \bar{\varphi} \rangle$), представлены на рис. 1. На нём также изображено среднее по времени локальное (вероятностное) газосодержание в центре канала ($\bar{\varphi}(0)$). В опытах было обнаружено, что независимо от начального распределения газа по сечению трубы (типа выбранного смесителя) пузырьковый режим наблюдается в области приведенных скоростей воздуха примерно до 0,01 м/с. Снарядный режим начинается, когда приведенная скорость воздуха превышает 0,02 м/с, а область от 0,01 м/с до 0,02 м/с является переходной.

В рамках модели потока дрейфа уравнение для истинного объёмного газосодержания, осредненного по сечению канала и времени, можно записать как

$$\langle \bar{\varphi} \rangle = \frac{\beta}{C_0 + \frac{U_{2j}}{U_{см}}}, \quad (1)$$

где, β — расходное объёмное газосодержание, C_0 — так называемый, параметр распределения, связан с неравномерностью профилей (плотности потока смеси $j(F)$, и истинного локального газосодержания $\bar{\varphi}(F)$;

$$C_0 \equiv \frac{\frac{1}{F} \int j(F) \bar{\varphi}(F) dF}{\frac{1}{F} \int j(F) dF \cdot \frac{1}{F} \int \bar{\varphi}(F) dF}, \quad (2)$$

U_{2j} и $U_{см}$ — соответственно средневзвешенная дрейфовая скорость газа и скорость смеси. Для барботажа $\beta = 1$, и $U_{см} = U_{02}$, где U_{02} — приведенная скорость газа — основная режимная характеристика барботажа.

Чтобы найти параметры модели потока дрейфа, т.е. C_0 и U_{2j} , используется алгоритм Гаусса-Ньютона. При решении можно получить C_0

$=1,198$, $U_{2j} = 0,159$, достоверность аппроксимации составляет 99,99%. Во многих работах установлено, что при снарядном режиме $C_0 = 1,2$, и $U_{2j} = 0,16$ м/с, что и совпадает с полученными данными. Если подставить эти значения C_0 и U_{2j} в ур. (1), то получим

$$\langle \bar{\varphi} \rangle = \frac{1}{1,2 + \frac{0,16}{U_{02}}} \quad (3)$$

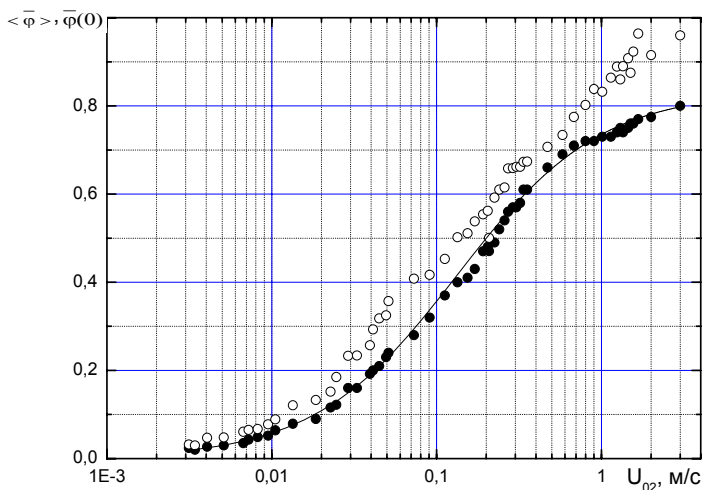


Рис. 1. Изменение истинного объемного газосодержания в зависимости от приведенной скорости воздуха (U_{02}): ●—опытные данные для $\langle \bar{\varphi} \rangle$; ○—опытные данные для $\bar{\varphi}(0)$; линия по формуле (3).

На рис. 2 представлены результаты измерения распределений локального вероятностного (осреднённого по времени) газосодержания по радиусу канала $\bar{\varphi}(r)$ при разных приведенных скоростях воздуха. Более удобно наблюдать степень заполненности профилей и их деформацию в зависимости от приведенной скорости воздуха в относительном виде $\frac{\bar{\varphi}(r)}{\langle \bar{\varphi} \rangle}$. Как видно из рис. 2, распределения локального вероятностного имеют

форму, близкую к форме степенной зависимости с максимумами в центре канала. По кривым распределения скоростей видно, что чем больше скорость воздуха, тем профиль становится более заполненным (более

равномерным). Экспериментальные данные удовлетворительно описываются степенной функцией;

$$\frac{\bar{\varphi}(r)}{\bar{\varphi}(0)} = 1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^n \quad (4)$$

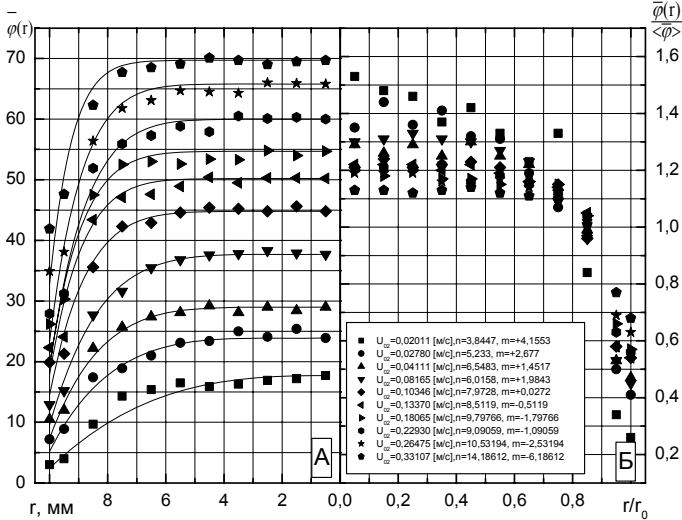


Рис. 2. Распределения газосодержания по сечению канала при разных скоростях воздуха в абсолютном (А) и относительном виде (Б). Линии по формуле (4)

С целью минимизировать погрешность аппроксимации по формуле (4) опытных данных по распределению локального паросодержания по сечению канала используется алгоритм Гаусса-Ньютона. Результат решения представлен на рис. 2.

Между $\bar{\varphi}(r)$ и $\langle \bar{\varphi} \rangle$ имеется балансная связь;

$$\langle \bar{\varphi} \rangle = \frac{1}{F} \int \bar{\varphi}(r) dF \quad (5)$$

где $F = \frac{\pi d^2}{4}$ площадь сечения канала.

Из соотношений (4) и (5);

$$n = \frac{2}{\frac{\bar{\varphi}(0)}{\langle \bar{\varphi} \rangle} - 1} \quad (6)$$

Зубер и Финдле предложили для плотности потока смеси (j) также степенную функцию;

$$\frac{j(r)}{j(0)} = 1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^m. \quad (7)$$

Учитывая соотношения (2), (4), (7) можно получить

$$C_0 = 1 + \frac{2}{m + n + 2} \quad (8)$$

Выше на основе эксперимента показано, что C_0 равняется 1,2. Отсюда при n больше восьми m становится отрицательным. Для этой области предложение (7) является некорректным. Только при малых приведенных скоростях воздуха ($U_{02} < 0,1$ м/с) можно принять m приблизительно равным 4-5, а для гидродинамических режимов характеризующих ($n > 8$) соотношение (7) вообще непригодно. Отрицательное значение m означает, что в пристенной области сечения канала поток j направлен в сторону, соответствует области обратную приведенной скорости воздуха (U_{02}).

Главы 4 и 5

Представлены результаты измерения параметров структуры снарядного течения при барботажном режиме в зависимости от приведенной скорости газа. Предложены расчетные формулы для определения газосодержания в жидкой пробке и доли времени следования снарядов. Разработана двухстадийная модель для определения параметров снарядного течения.

Снарядный режим характеризуется движением в жидкости крупных газовых пузырей, имеющих снарядообразную форму (называемых пузырями Тейлора или снарядами газа). Поперечные размеры таких пузырьков соизмеримы с поперечным сечением канала, а длина может достигать нескольких диаметров трубы. От стенки снаряды отделены слоем текущей жидкости, а друг от друга — жидкостными пузырьковыми пробками.

В данной работе приводятся новые экспериментальные данные по параметрам водо-воздушного адиабатного подъемного снарядного течения в вертикальной трубе с внутренним диаметром 21 мм при барботажном режиме. Опыты проводились при давлении, близком к атмосферному (1,1 ÷ 1,2 атм.). Температура фаз в потоке была практически постоянна и приблизительно соответствовала комнатной температуре (~15 °C). При проведении опытов сигналы со схем измерения локального и среднего газосодержаний наблюдались на электронных осциллографах и записывались на шлейфовых осциллографах. Учитывая достаточное расстояние датчиков от смесителя, структуру снарядного потока можно было считать развитой. Это означает, что перед каждым снарядом профили скоростей жидкости в предыдущей

пузырьковой пробке одинаковы, скорости снарядов газа практически тоже одинаковы и слияние снарядов практически не происходит. Косвенно об этом можно судить (по данным ряда исследований), если относительная длина пузырьковых пробок между снарядами достигает значения $L_{пр}/d=7,5 \div 16$, что и наблюдалось в настоящих экспериментах. Условимся индексами 1 и 2 обозначать жидкость и газ; а индексами “пр” и “сн” две временных стадии, которые принадлежат к пузырьковой пробке или кольцевой структуре в сечении канала со снарядом соответственно.

Развитый снарядный поток в трубе может быть представлен (рис. 3) в виде регуляризированной структуры со статистическим осредненными параметрами $\langle \varphi_{сн} \rangle$, $\langle \varphi_{пр} \rangle$, $\langle \varphi \rangle$, ψ , $\overline{L}_{сн}$, $\overline{L}_{пр}$, $\overline{L} = \overline{L}_{сн} + \overline{L}_{пр}$ и частотой следования снарядов f . Здесь,

$\langle \varphi_{пр} \rangle$ — среднее по времени и сечению канала газосодержание в жидкостных пробках; $\langle \varphi_{сн} \rangle$ — среднее по времени и по сечению канала газосодержание в снарядах; ψ — средняя доля времени следования снарядов за контрольное время; $\overline{L}_{сн}$ и $\overline{L}_{пр}$ — средние длины снарядов и пробок.

Существенно, что параметры $\langle \varphi_{пр} \rangle$ и $\langle \varphi_{сн} \rangle$ являются не просто средними, а средними с учётом временного веса (средневзвешенными). Пусть U_n — скорость носа снаряда, которая в самом общем случае не совпадает со средней скоростью газового снаряда ($U_{2сн}$) вследствие возможного слияния пузырьков жидкостной пробки с носом снаряда. У кормы снаряда концентрация пузырьков несколько выше, чем в основной части жидкостной пузырьковой пробки из-за вихря, образуемого жидкой

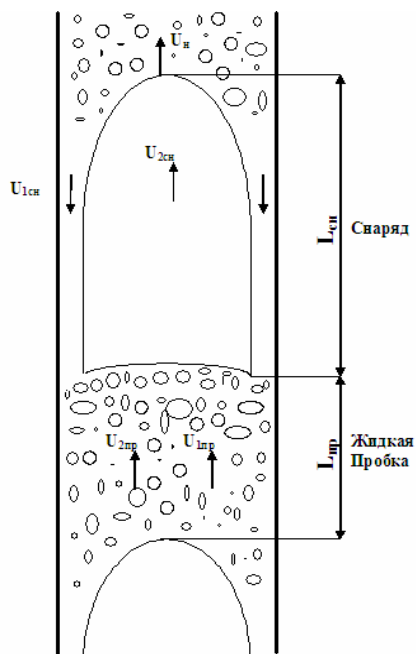


Рис. 3. Модельная схема вертикального снарядного потока

пленкой, и срыва газа с кормы снаряда. Одна часть этого сорванного газа возвращается в снаряд из зоны с повышенной концентрацией пузырьков, а другая остается в жидкостной пробке, компенсируя потерю газа из неё вследствие слияния части пузырьков с последующим снарядом. Таким образом, на движение вверх газа в снарядах и пробках (основное движение) как бы накладывается продольное встречное движение газа, вызванное слиянием пузырьков с носом снаряда и срывом части газа с кормы снаряда, вхождением сорванного газа в жидкостную пробку и дальнейшим поглощением эквивалентного количества газа последующим снарядом. Такой встречный массоперенос через снаряд обуславливает неравенство $U_n \neq U_{2сн}$, причем $U_{2сн}$ приобретает смысл истинной скорости газового снаряда, определяемой разницей прямого и встречного массопереносов. Другим непосредственным результатом встречного массопереноса является отличие осредненных по сечению истинных скоростей газа снаряда ($U_{2сн}$) и газа пузырьковой пробки ($U_{2пр}$). Идея о возможности существования встречного массопереноса была впервые высказана Фернардом, и пока ещё это явление недостаточно изучено.

Величины $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle$, $\langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle$ и $\langle \overline{\varphi} \rangle$ связаны между собой структурным соотношением

$$\langle \overline{\varphi} \rangle = \langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle \cdot (1 - \psi) + \langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle \cdot \psi \quad (9)$$

и расходных соотношением

$$U_{02} = (1 - \psi) \langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle U_{2пр} + \psi \cdot U_{2сн} \langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle. \quad (10)$$

Из уравнений несжимаемости можно получить два уравнения относительного движения.

В системе координат, жёстко связанной с носом снаряда, уравнение движения газового потока относительно носа снаряда

$$(U_n - U_{2пр}) \langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle = (U_n - U_{2сн}) \langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle, \quad (11)$$

уравнение движения жидкого потока относительно носа снаряда

$$(U_n - U_{1пр})(1 - \langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle) = (U_n - U_{1сн})(1 - \langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle). \quad (12)$$

Скорость газа в снарядах может быть представлена соотношением

$$U_{2сн} = 1,2U_{02} + 0,35 \sqrt{gd \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}}. \quad (13)$$

Вклад снарядов с кольцевой структурой в общее газосодержание $\langle \overline{\varphi} \rangle$ описывается членом $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle \psi$ (соотношение (9)), определяющим в большей части области изменения U_{02} . Однако, вклад пробок $\langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle (1 - \psi)$ и кольцевой структуры снарядов $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle \psi$ в общее

газосодержание при малых U_{02} (ближе к границе с пузырьковым режимом течения) становится сопоставимым. В этой области малых газосодержаний заметно падает временной вес снарядов (ψ), $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle$ и возрастает временной вес пузырьковых пробок ($1-\psi$) (рис. 4).

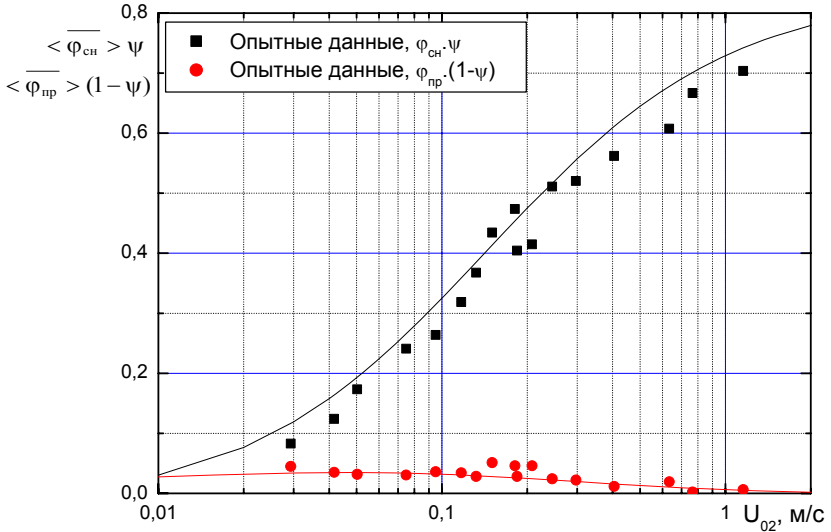


Рис. 4. Вклады снарядов и пробок в общее газосодержание $\langle \overline{\varphi} \rangle$. Линии по формулам (3), (9), (14), (19).

Поскольку главный вклад в истинное газосодержание дают снаряды, то в случаях простых расчётов и оценок достаточно часто полагают $\langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle = 0$. Однако этот прием достаточно груб. Другие исследователи принимают $\langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle = \text{const}$. Изменение газосодержания в пузырьковых пробках $\langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle$ при изменении приведенной скорости газа, представлено на рис. 5. Заметно отличие барботажных точек от зависимости при вынужденном газожидкостном потоке. Это отличие заключается в том, что при скоростях $U_{02} > 1$ м/с при барботажном режиме намечается тенденция к перестройке структуры двухфазной смеси и прорыву газа по центральной части трубы. Такого прорыва в опытах ещё не наблюдалось и режимы при $U_{02} = 1-3$ м/с ещё не дошли до описываемых критическим числом

Кутателадзе. По этой причине можно предложить соотношение для $\langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle$;

$$\langle \overline{\varphi_{пр}} \rangle = \frac{0,14 \cdot \sqrt[3]{U_{02}}}{1 + 2 \cdot U_{02}} \quad (14)$$

где U_{02} — м/с.

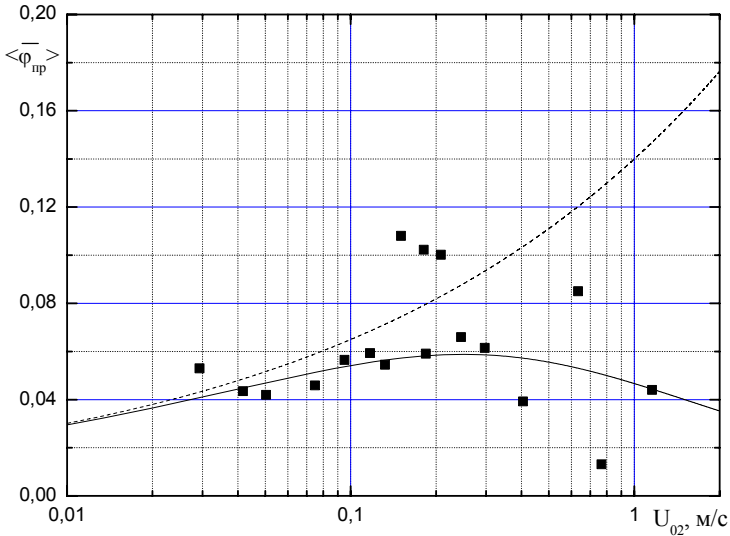


Рис. 5. Среднее газосодержание в жидких пробках в зависимости от приведенной скорости воздуха U_{02} . ■ — опытные данные. Линия по формуле (14). Штриховая линия по данным вынужденного течения.

Исследователи снарядного потока отмечают, что в качестве показателя развитой структуры потока следует считать уравнение $\overline{L_{пр}} / d = \text{const}$ ($\text{const} = 7,5 \div 16$). В данной работе $\overline{L_{пр}} / d$ наблюдались в пределах $8,5 \div 12$ и можно принять в среднем;

$$\frac{\overline{L_{пр}}}{d} = 10,5, \quad (15)$$

поскольку (в соответствии с рис. 3) $\psi = \overline{L_{сн}} / (\overline{L_{сн}} + \overline{L_{пр}})$, то средняя длина снарядов;

$$\frac{\overline{L_{сн}}}{d} = \frac{\overline{L_{пр}}}{d} \frac{\psi}{1 - \psi}, \quad (16)$$

а частота следования снарядов

$$f = \frac{U_{2\text{сн}}}{L_{\text{сн}} + L_{\text{пр}}} . \quad (17)$$

Для взаимосвязанного определения всех параметров структуры и скоростей необходимо, чтобы число уравнений было равно числу неизвестных. Пока система уравнений (9)-(17) (9 уравнений и 12 неизвестных) получилась разомкнутой.

В данной работе специально измерялись величины скоростей носа снарядов U_n и они сопоставлялись (рис. 6) со скоростью газа в снарядах $U_{2\text{сн}}$ (определяемой по истинному газосодержанию). Хорошо видно, что не наблюдается сколько-нибудь закономерного отклонения точек вправо от биссектрисы. Это свидетельствует о слабом влиянии встречного массопереноса. Таким образом, можно принять $U_n = U_{2\text{сн}} = U_{2\text{пр}} \equiv U_2$, и тогда система уравнений упрощается, а число неизвестных становится равным 10. Для замыкания системы уравнений не хватает ещё одного уравнения. Ниже предлагается два варианта выхода из этого затруднения. По первому варианту на основе оценки толщины плёнки вокруг снаряда по ряду теоретических и экспериментальных исследований можно предложить расчётную формулу для $\overline{\langle \varphi_{\text{сн}} \rangle}$:

$$\overline{\langle \varphi_{\text{сн}} \rangle} = \frac{1}{L_{\text{сн}}} \int_0^{L_{\text{сн}}} \frac{U_{02} + U_n - (U_{02} + U_n)e^{-10x}}{U_n + U_2 - (U_{02} + U_n)e^{-10x}} dx , \quad (18)$$

где $U_n = 9,916 \left[\text{gd} \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1} (1 - \sqrt{\overline{\langle \varphi_{\text{сн}} \rangle}}) \right]^{0,5}$ — средняя скорость в плёнке жидкости вокруг газового снаряда, м/с.

По другому варианту можно воспользоваться опытной формулой для доли времени следования снарядов ψ , являющейся наиболее информативным параметром (для газосодержания $\overline{\langle \varphi \rangle}$). Долю времени следования снарядов ψ можно интерпретировать как временной вес кольцевой структуры в снарядном потоке. Сильное влияние приведенной скорости на величину ψ определяет такое же сильное влияние на величину $\overline{\langle \varphi \rangle}$. Обработав экспериментальные данные по доли времени следования снарядов, можно получить

$$\psi = \frac{1 + 0,03 \cdot U_{02}}{1,05 + 0,14/U_{02}} , \quad (19)$$

Сравнение расчётных и экспериментальных данных в случае первого варианта (т.е. когда используется формула для $\overline{\langle \varphi_{\text{сн}} \rangle}$) и второго варианта

(т.е. когда используется формула для ψ) представлено на рис. 7 ÷ 12. Очевидно, что экспериментальные данные и расчетные оценки по первому и второму варианту близки. Однако первый вариант базируется на данных других авторов и требуется итерация, чтобы решить систему уравнений. В то время как второй вариант базируется на данных настоящей работы и неизвестные параметры можно получить при прямом расчете системы уравнений.

Истинные скорости фаз, средние по той доле сечения, которую занимают фазы в пузырьковой пробке или сечении снаряда, определены расчётным путём при решении системы уравнений (рис. 11, 12). Величины эти экспериментально не измерялись. Поскольку остальные расчётные параметры структуры вполне удовлетворительно согласуются с данным экспериментов, можно полагать, что и кинематические параметры, связанные с ними общими закономерностями модели, косвенно находят экспериментальное подтверждение. На рис. 12 также представлен расчёт по одностадийной модели, разработанной в данной работе.

Определение толщин жидких кольцевых пленок вокруг паровых снарядов может представлять интерес для расчётов переменности во времени теплоотдачи, пульсаций температур стенки, кризиса теплообмена при кипении, а также для расчета цикличности во времени механических термонапряжений в стенках каналов. Кроме величин $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle$ в опытах специально фиксировались и величины $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle_{\max}$, наблюдавшиеся у кормы снаряда. Результаты экспериментов по $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle$ и $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle_{\max}$, и пересчёт их в значения $\overline{\delta}$ и $\overline{\delta_{\min}}$ соответственно, а также результаты расчётов по одностадийной модели, разработанной в данной работе, представлены на рис. 13. Средние толщины кольцевых пленок не фигурируют в системе уравнений, но могут быть вычислены в соответствии с геометрической формулой (20) по опытным $\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle$. Если допустить концентричное расположение снаряда в трубе, а кольцевую пленку жидкости вокруг снаряда предположить равномерной по периметру, то

$$\overline{\delta} = \frac{d}{2} (1 - \sqrt{\langle \overline{\varphi_{сн}} \rangle}). \quad (20)$$

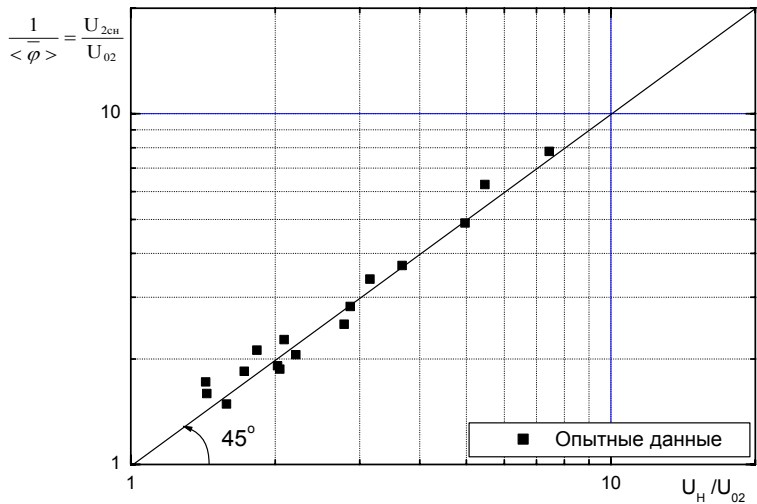


Рис. 6 Корреляция $U_{2\text{сн}}/U_{02}$ и $U_{\text{н}}/U_{02}$.

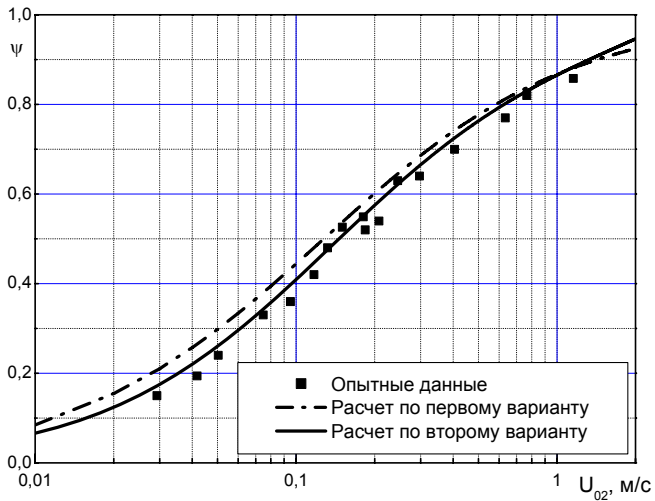


Рис. 7. Доля времени следования снарядов

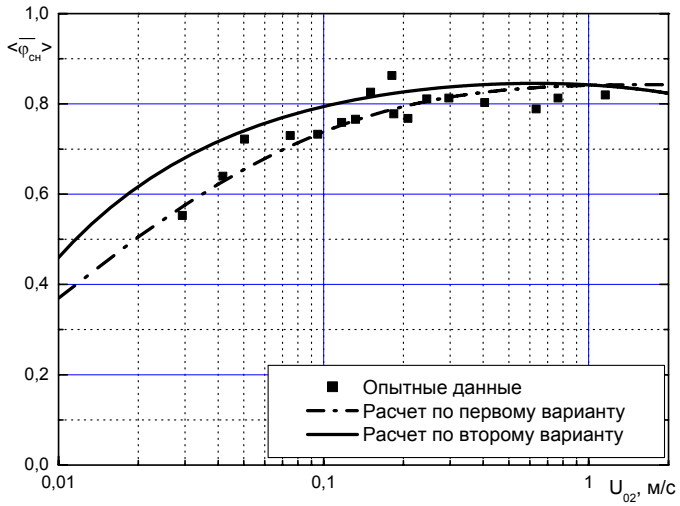


Рис. 8. Среднее газосодержание в снарядах

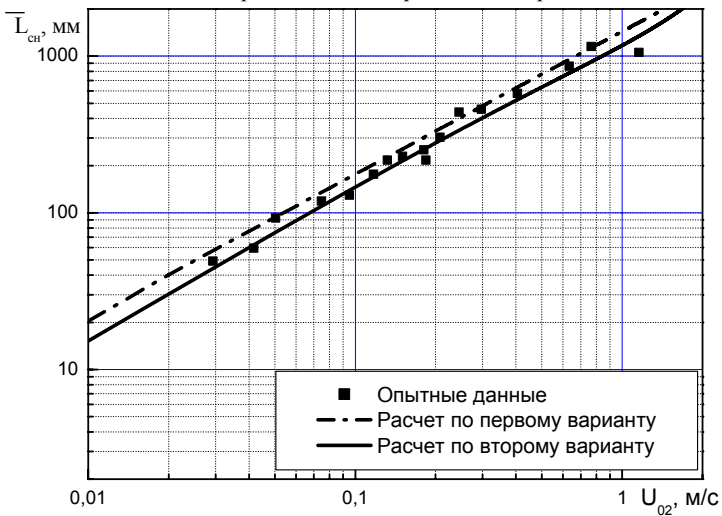


Рис. 9. Средняя длина снарядов

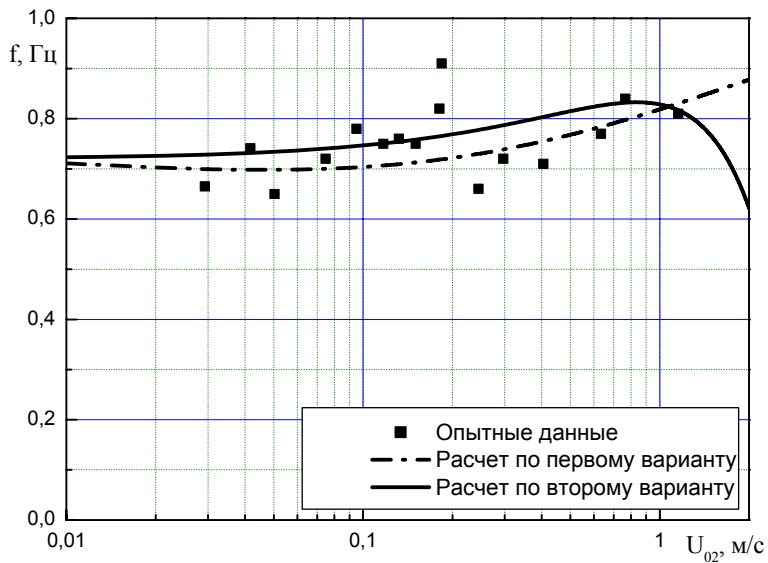


Рис. 10. Частота следования снарядов

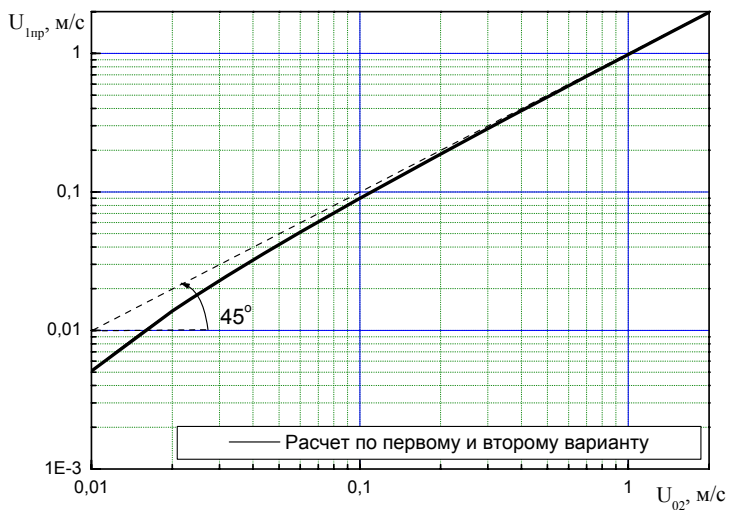


Рис. 11. Средняя скорость жидкости в жидкой пробке

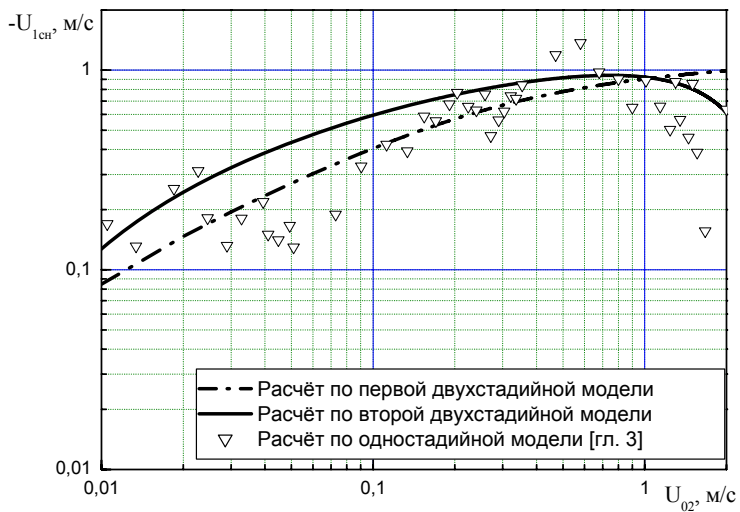


Рис. 12. Средняя скорость жидкости в опускной пленке вокруг снаряда

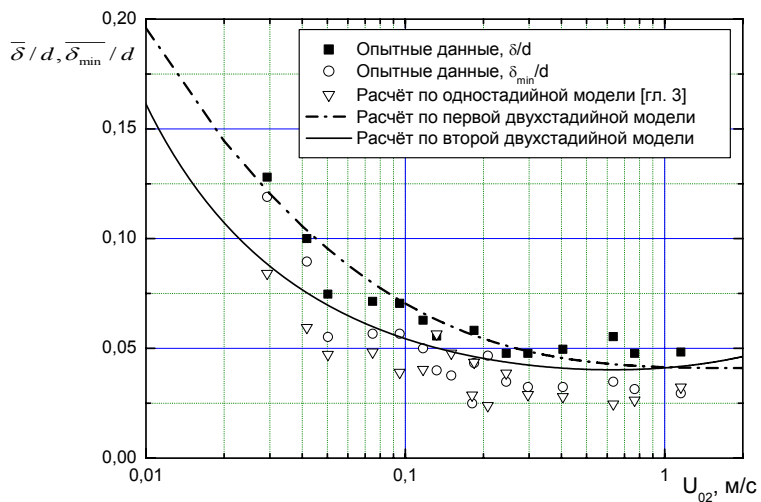


Рис. 13. Средние и минимальные толщины кольцевых пленок

Основные результаты работы

1. Проведённые эксперименты позволили установить, что в трубах небольшого диаметра при барботажном режиме независимо от начального распределения газа по сечению трубы (типа выбранного смесителя) пузырьковый режим наблюдается в неширокой области приведенных скоростей воздуха (примерно до 0,01 м/с). Снарядный режим начинается, когда приведенная скорость воздуха превышает 0,02 м/с, а область от 0,01 м/с до 0,02 м/с является переходной.
2. Изученная связь истинного газосодержания ($\langle \bar{\varphi} \rangle$) и приведённой скорости воздуха позволила предложить расчётное соотношение, подобное по структуре соотношению модели потока дрейфа с параметром распределения $C_0 = 1,2$ и средневзвешенной дрейфовой скоростью $U_{2j} = 0,16$ м/с.
3. В рамках модели потока дрейфа обобщены результаты исследования радиальных профилей газосодержания и представлена зависимость их формы от режимных факторов. Установлена неудовлетворительность гипотезы Зубера и Финдлера о подобии распределения локального газосодержания и плотности объёмного потока смеси.
4. При снарядном режиме профили газосодержания имеют максимум в центре канала. Измеренные распределения локального газосодержания по радиусу канала в первом приближении удовлетворительно описываются степенными функциями с переменным показателем степени n .
5. Разработано параметрическое описание снарядного потока, позволяющее учесть его двухмерность и внутреннюю нестационарность. Комплекс временных, пространственных параметров базируется на понятиях вероятностного локального и среднего по времени и объёму (сечению) газосодержаний. Выведены правила осреднения параметров. Установлена связь осредненных параметров снарядного потока и режимных факторов.
6. Представленные экспериментальные данные по структуре снарядного барботажного режима в трубе небольшого диаметра свидетельствуют о том, что параметры структуры имеют статистическую природу, при этом просматриваются чёткие зависимости изменения их средних величин от режима барботажа (U_{02}). Барботажный режим является на карте режимов течения ДФП предельной границей практически реализуемых вынужденных режимов и для него характерны такие же статистические параметры. Однако количественная, а иногда и качественная, зависимость параметров от режимного фактора оказываются разными.

7. На основе экспериментальных данных по параметрам снарядной структуры предложены два эмпирических уравнения для доли времени следования снарядов и газосодержания в пузырьковых пробках. Полученные новые экспериментальные данные позволили получить информацию о зависимости параметров структуры снарядного течения от режимного фактора барботажа.
8. Разработана двухстадийная расчётная модель, позволяющая связать все параметры снарядного потока в комплектной системе уравнений. Модель является попыткой отхода от одномерных описаний, так как она позволяет учесть крупномасштабную пространственную и временную неравномерности в снарядном потоке. Эти неравномерности учитываются в двухстадийном процессе (стадии следования парового снаряда и стадии следования жидкостной пузырьковой пробки). Кроме того, пространственная неравномерность в стадии следования снарядов учитывается разделением сечения трубы на область с ниспадающей жидкой пристенной плёнкой и область газового снаряда.
9. Проведено систематическое сопоставление расчетных (по модели) и экспериментальных параметров снарядного потока, в том числе и доступных данных других исследователей. Результаты сравнения можно считать вполне удовлетворительными даже в областях, граничащих с другими структурами течения.
10. Параметрическая двухстадийная расчётная модель является относительно несложной для инженерных теплогидравлических расчётов газожидкостных трактов современных энергетических установок, аппаратов химико-технологической и газонефтяной промышленности, где реализуется снарядное течение в штатном рабочем процессе, в переходной или аварийной ситуации.

Основные результаты представлены в следующих работах

1. Омар Х., Похвалов Ю. Е., Гидродинамика и структура двухфазного потока при барботажном режиме в трубах небольшого диаметра//Теплоэнергетика, 2006, № 4, С. 74-77.
2. Омар Х., Похвалов Ю. Е., Параметры снарядного течения при барботажном режиме в трубах небольшого диаметра//Теплоэнергетика, 2007, № 1, С. 59-62.
3. Омар Х., Похвалов Ю. Е., Гидродинамическая модель развитого снарядного течения при барботажном режиме в трубах небольшого диаметра//Теплоэнергетика, (в печати).

4. Омар Х., Похвалов Ю. Е., Взаимосвязь параметров структуры развитого снарядного течения при барботажном режиме в трубах небольшого диаметра//Инженерная физика, 2006, № 2, С. 24-29.
5. Омар Х., Похвалов Ю. Е., Истинное газосодержание при барботажном режиме водо-воздушного потока в трубе//Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2005, Т. 8, С. 127.
6. Омар Х., Похвалов Ю. Е., Структура снарядного режима при барботажном режиме в трубах небольшого диаметра//Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2006, Т. 8, С. 133.
7. Омар Х., Похвалов Ю. Е., Структурная модель снарядного течения при барботажном режиме в трубах небольшого диаметра//Четвертая Российская Национальная Конференция По Теплообмену (РНКТ-2006), Т. 5, С. 280-283.
8. Омар Х., Похвалов Ю. Е., Математическая модель развивающегося снарядного течения при барботажном режиме в трубах небольшого диаметра//Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2007, Т. 8, С. 123.