

УДК 532.529.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ В РЕЖИМЕ ГАЗЛИФТА

Евсеев Алексей Романович,

evseev@itp.nsc.ru

Сибирское отделение Российской академии наук,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1.

Актуальность. Проблема надежного проектирования газлифтных подъемников в настоящее время является актуальной в связи с широким использованием этого способа эксплуатации скважин при добыче нефти, развитием эрлифтов для транспортировки пульпы, добычей полезных ископаемых с морского дна и др. Механизм действия систем газлифт не совсем понятен, так как он проходит в сложных условиях, при различных ориентациях трубы и большой длине, с переменными физическими свойствами фаз в изменяющихся режимах течения.

Цель работы: экспериментальное исследование структуры газожидкостного потока в вертикальной трубе (режим газлифта) с применением лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком, измерение профилей скорости и концентрации газовой фазы в поперечном сечении трубы.

Методы исследования: лазерный доплеровский анемометр с волоконно-оптическим датчиком для измерения профилей скорости и концентрации газовой фазы в поперечном сечении трубы.

Результаты. Проведено исследование эффективности газлифта и структуры газожидкостного потока в вертикальной трубе с помощью лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком. В поперечном сечении газожидкостного потока можно выделить три характерных зоны. В отличие от пристенной зоны с минимальными значениями параметров, скорость и концентрация газовой фазы резко возрастают в переходной зоне, затем они плавно увеличиваются до максимума в центральной зоне трубы. Снарядный режим течения при газлифте является основным, жидкость поднимается в пробках между газовыми снарядами. Скорости верхней и нижней стенок снаряда одинаковы в центральной области трубы, но в переходной зоне скорость переднего фронта замедляется, а заднего, наоборот, ускоряется под действием стекающей пленки жидкости, образующей стенки снаряда. Скорость мелких пузырьков в пробках одинакова в центральной и переходной зонах.

Ключевые слова:

Газлифт, снарядный режим потока, большие пузыри, концентрация и скорость газовой фазы, лазерный доплеровский анемометр с волоконно-оптическим датчиком.

Введение

Проблема надежного проектирования газлифтных подъемников является в настоящее время весьма актуальной в связи с широким применением данного способа для добычи нефти, развитием эрлифтов для транспортировки пульпы, добычей полезных ископаемых с морского дна, для откачки воды в шахтах, для геотермальной энергетики и др. В эрлифтах сочетаются простота устройства, отсутствие движущихся частей, возможность содержания взвеси в транспортируемой жидкости и сжатый воздух в качестве источника энергии.

Большой вклад в исследование газожидкостных потоков, включая подъем жидкости в трубах восходящим потоком газа внесли в нашей стране: А.А. Арманд, Б.Г. Багдасаров, А.П. Крылов, С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович, В.Е. Накоряков, Н.Н. Константинов, В.И. Субботин, О.В. Клапчук, О.Н. Кашинский и др., а также зарубежные исследователи: G.K. Batchelor, A.E. Dukler, M.R. Davis, P. Griffith, R.A. Heringe, I. Kataoka, D.J. Niklin, Z.-S. Mao, F. Pickert, A. Serizawa, S.L. Soo, G.B. Wallis et al. [1–14]. Требования практического проектирования подъемников привели к появлению многочисленных методов расчета. В ведущих институтах ВТИ, ЦКТИ, ЭНИН, ВНИИГАЗ вышла большая серия работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям гидравлики паро- и газожид-

костных потоков. Итогом этого большого цикла исследований явилась разработка руководящих материалов для расчета нефтегазопроводов, котельных агрегатов и др. [15–19]. Результаты недавних исследований проблем газлифта представлены в работах [20–27]. Несмотря на широкое применение эрлифтов, универсальный аналитический расчет не создан из-за очень сложной связи между закономерностями движения двух–трех фазного потока в трубах, и свойствами перекачиваемых жидких объектов.

В [28–32] дан подробный обзор и анализ работ, посвященных исследованию снарядного режима газожидкостного потока и газлифтного подъемника, а также приведены результаты исследования структуры потока и его характеристик с применением электродиффузионного метода. Показано, что наличие большого числа параметров, определяющих характеристики газожидкостных потоков, приводит к невозможности их измерения для всех возможных случаев, встречающихся на практике. Отмечается, что чрезвычайная сложность процессов взаимодействия на границе фаз в двухфазном потоке приводит к необходимости создания методик расчета, учитывающих реальную внутреннюю структуру течения, получаемую в экспериментальных исследованиях.

В работе [28] проведено экспериментальное исследование структуры газожидкостного течения в

вертикальной трубе диаметром 15 мм и длиной 6000 мм в режиме газлифта. Было показано, что оптимальные режимы работы такого устройства не зависят от способа подачи газовой фазы и находятся в области снарядно-кольцевого режима. Жидкость транспортируется в пробках между газовыми снарядами со скоростью, равной приведенной скорости смеси. Это соответствует положительно значению касательного трения на боковой стенке трубы. Но существует интенсивное обратное течение, вызванное стеканием жидкой пленки, окружающей снаряд, которое соответствует отрицательному касательному напряжению трения на стенке трубы. Данная работа является продолжением экспериментального исследования структуры газожидкостного потока в вертикальной трубе диаметром 16 мм и длиной 2700 мм в режиме газлифта.

Целью исследований являлось измерение с помощью лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком следующих величин: распределение интегральной скорости газовой фазы, скорости верхней и нижней границ снарядов в поперечном сечении трубы; распределение скорости пузырьков в жидких прослойках между снарядами; распределение локального газосодержания по сечению трубы; а также расхода транспортируемой жидкости в зависимости от расхода газа.

Описание экспериментальной установки и методики измерений

По принципу действия газлифт относится к разностно-плотностному динамическому насосу, в котором для транспортировки воды используется энергия сжатого воздуха. Экспериментальное исследование структуры потока в вертикальной трубе в режиме газлифта с помощью лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком (ЛДВА) проводилось на установке, которая представляла замкнутый по жидкости циркуляционный контур. Блок-схема установки показана на рис. 1. Вода из бака-сепаратора – 4 направлялась по стояку сливной линии – 5 на смеситель – 1, установленный на входе в вертикальную рабочую часть – 2 (подъемную трубу), изготовленную из стеклянной трубки с внутренним диаметром 16 мм и длиной 2700 мм. Для создания двухфазного потока в смеситель поступал газ из магистрали (линия 6), который проходил через регулировочный вентиль – 7, расходомерную диафрагму – 8 и вдувался в смеситель через сопло диаметром 4 мм, здесь 9 и 10 – манометры для измерения дифференциального и статического давления, соответственно. Смеситель – 1 представлял собой сосуд диаметром около 120 мм, в который по оси была помещена трубка из оргстекла с внешним диаметром 40 мм. В трубке было просверлено 96 отверстий диаметром 0,5 мм для вдува газа. Подача жидкости осуществлялась через три штуцера, рас-

положенные в днище по периметру. Такая конструкция обеспечивала создание газожидкостной смеси с достаточно однородными пузырьками газа. Газожидкостная смесь, образованная в смесителе, поднималась по рабочей части и направлялась в бак – 4 для разделения жидкости и газа. Отработанный газ выходил в атмосферу, а жидкость поступала в мерную емкость для измерения расходной характеристики газлифта, затем в бак – 4.

Измерительный блок – 3 с волоконным световодом в качестве датчика был установлен на расстоянии 2200 мм от смесителя. Датчиком ЛДВА служил выходной торец многомодового кварцевого световода с размерами поперечного сечения (0,05/0,15/0,220 мм) и длиной около 7 м. Здесь указаны диаметры световедущего ядра, отражающей оболочки и вторичного защитного покрытия из эпоксиакрилата, соответственно. Дальний конец световода вводился в тонкую медицинскую иглу с внутренним диаметром 0,5 мм, которая закреплялась в тонкой трубке из нержавеющей стали, изогнутой под 90° навстречу потоку. Трубка закреплялась в координатном устройстве, с помощью которого датчик ЛДВА направлялся в исследуемую область газожидкостного потока. Погрешность измерения поперечной координаты составляла 0,05 мм. Световод в схеме измерения выполнял роль приемо-передающей антенны.

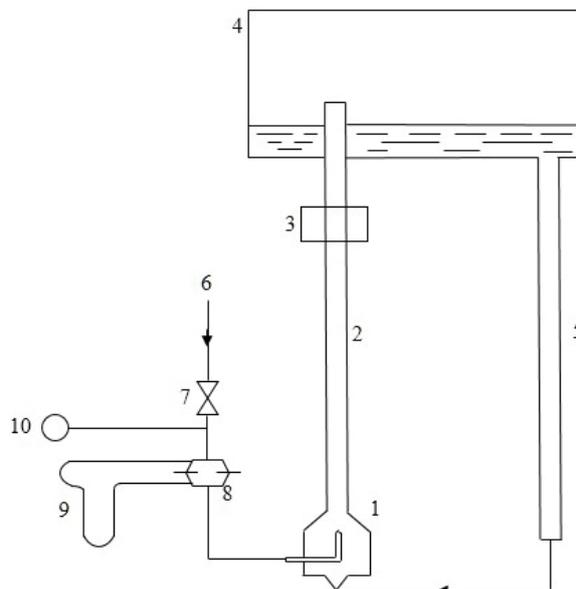


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – смеситель, 2 – рабочая часть, 3 – измерительный блок, 4 – бак-сепаратор, 5 – сливная линия, 6 – газовая линия, 7 – регулировочный вентиль, 8 – расходомерная диафрагма, 9 – дифференциальный манометр, 10 – манометр статического давления

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup: 1 is the mixer, 2 is the test section, 3 is the measuring block, 4 is the separation tank, 5 is the drain line, 6 is the gas line, 7 is the control valve, 8 is the orifice plate, 9 is the differential pressure gauge, 10 is the static pressure gauge

Лазерный доплеровский анемометр с волоконно-оптическим датчиком

При исследовании локальных гидродинамических характеристик газожидкостных потоков преимуществами ЛДВА являются: возможность работы в потоках с малой оптической прозрачностью; с помощью длинного и обладающего большой гибкостью световода появляется возможность удалять объект исследования от прибора на расстояние порядка 100 м и более; возможность измерения пространственного распределения гидродинамических характеристик с достаточно высоким разрешением. Основным недостатком является контактность метода, что приводит к возмущению потока волоконно-оптическим зондом. Для уменьшения возмущений потока волоконно-оптический датчик применяют в миниатюрном исполнении диаметром 0,05–0,15 мм.

В ЛДВА скорости движения несущей среды и дисперсной фазы определяются по доплеровскому сдвигу частоты в свете, рассеянном движущимися частицами или пузырьками, как в обычных ЛДА. Эффект измерения скорости в оптически непрозрачном (в целом) потоке достигается путём ввода световода (или пучка световодов) в заданную область потока. Информация о скорости движения частиц берётся из области в непосредственной близости от торца световода. Блок-схема ЛДВА для измерения скорости и концентрации дисперсной фазы в газожидкостных потоках показана на рис. 2 [33, 34]. Луч гелий-неонового лазера I типа ЛГ-79-1 (мощность 15 мвт, длина волны излучения $\lambda=0,63$ мкм) проходит через отверстие в зеркале – 2, установленном под углом к направлению луча, и микробиъективом – 3 вводится в многомодовый световод – 4. Роль опорного пучка в схеме выполняет волна, отражённая от выходного торца световода, здесь 5 – наконечник волоконного датчика, который вводится в двухфазный поток. При подходе газового пузырька к торцу отраженный (рассеянный) им свет зондирующего излучения частично попадает обратно в световод. Совместно с опорной волной рассеянное (отраженное) пузырьком излучение проходит по световоду в обратном направлении и объективом – 3 направляется на наклонное зеркало, затем на поляризационный фильтр – 6, плоскость пропускания которого ортогональна плоскости поляризации луча лазера. При этом происходит разделение зондирующих и сигнальных пучков по поляризационному признаку. Линза – 7 направляет пучки через полевую диафрагму – 8 на фотоприёмник – 9. Поскольку оба пучка имеют высокую степень когерентности, их интерференция в плоскости фотоприёмника приводит к высокочастотной модуляции тока. Таким образом, рассматриваемая схема аналогична по принципу действия схеме с опорным пучком обычного ЛДА, работающего в режиме обратного рассеивания [35]. Электронная часть системы измерения содержит: фотоприёмник – 9, специальный логический блок – 10, блок – 11 для измерения

концентрации газовой фазы, и анализатор спектра – 12 для измерения скорости межфазных границ. Специальный логический блок – 10 служит для фильтрации и выделения различных межфазных границ в снарядном режиме газожидкостного потока (переднего или заднего фронта снаряда, пузырьков газа в пробках между снарядами).

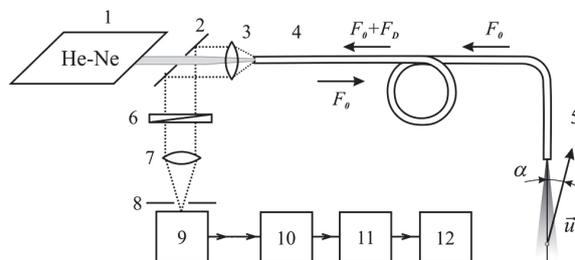


Рис. 2. Блок-схема лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком

Fig. 2. Block diagram of laser Doppler anemometer with fiber-optical probe

Связь между проекцией скорости межфазной поверхности на ось световода и измеряемой доплеровской частотой F_D определяется известным выражением

$$U \cos \alpha = F_D \lambda / 2n_f, \quad (1)$$

где $U \cos \alpha$ – проекция вектора скорости границы (или пузырька) на продольную ось световода, n_f – показатель преломления исследуемой среды. Из-за расходимости лазерного пучка на выходе из световода возникает систематическая погрешность в измерении скорости частицы, которая не превышает $\pm 5\%$ [36, 37]. В момент накалывания пузырька на наконечник световода происходит деформация межфазной поверхности и замедление скорости всплытия из-за интрузивной природы волоконного датчика. Датчик «видит» криволинейную отражающую поверхность в пределах своей апертуры ($NA=0,1$ и $0,2$ для одномодового и многомодового световодов), поэтому при углах между наконечником датчика и межфазной поверхностью больше апертуры световода доплеровские сигналы отсутствуют и измерение скорости пузырьков невозможно [38, 39].

Локальное газосодержание Φ в данной точке определяется как вероятность присутствия в данной точке газовой фазы, поэтому локальную объёмную концентрацию пузырьков можно измерять, как долю времени пребывания волоконного датчика в газовой среде ($\sum t_i$) относительно полного времени измерения T , согласно алгоритму

$$\Phi = (\sum t_i) / T, \quad (2)$$

где t_i – время нахождения волоконного датчика в пузырьке. При смене жидкой и газовой фазы, в которую погружался торец световода в газожидкостном потоке, на выходе фотоприёмного устройства возникал импульс фототока почти прямоугольной формы, связанный с изменением коэффициента отражения от его торца при пересечении

межфазных границ ($n_f=1$ – воздух, $n_f=1,33$ – вода). Зависимость формы импульса фототока от угла накаливания на световод исследована в [38, 39]. Необходимый уровень порога компаратора определялся при калибровке волоконного датчика и сравнении его показаний с эталонным датчиком проводимости в газожидкостном потоке в вертикальной трубе [36, 40].

Результаты исследований

Работа газлифта в пузырьковом режиме не приводила к подъему и выносу жидкости из рабочего участка. На рабочих режимах происходило достаточно быстрое слияние пузырьков с образованием снарядного режима течения, который сохранялся во всем диапазоне расходных параметров. Визуальные наблюдения показали, что распределение пузырей по размерам не сохранялось по высоте рабочей части. Помимо процесса слияния пузырей с образованием снарядов, происходило (частично) их дробление в моменты нисходящего движения жидкости. В результате в выходном участке трубы имел место снарядный режим течения, в котором пробки жидкости между снарядами содержали большое количество пузырьков, вся смесь поднималась вверх.

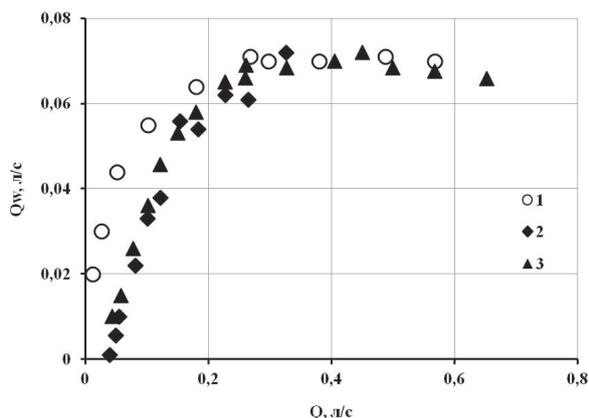


Рис. 3. Зависимость расхода жидкости при газлифте от расхода газа

Fig. 3. Dependence of liquid flow rate at gas lift on gas flow rate

На рис. 3 показано, что количество лифтируемой жидкости (Q_w) увеличивается с ростом расхода газа Q (приведенного к нормальным условиям) до оптимальной величины, после которой происходит ее уменьшение. При этом длина газовых снарядов увеличивается, и растет загазованность жидких пробок. Максимальная эффективность газлифта соответствует области перехода к снарядно-кольцевому режиму течения. Для сравнения на графике представлены результаты (точки 2, 3) по эффективности газлифта в трубе диаметром 15 мм и длиной 6000 мм [24]. При расходах газа больше 0,2 л/с эффективность газлифта в обоих случаях одинакова. Их различие при малых расходах газа объясняется, по-видимому, разной высотой столба жидкости над местом ввода газа (глубиной погру-

жения). Как показано в [24], лифтирование жидкости происходит в жидких перемычках между снарядами, но существует и интенсивное обратное течение, вызванное гравитационным стеканием жидкой пленки, окружающей снаряд.

Профили скорости газовой фазы

Измерение скорости газовой фазы проведены лазерным доплеровским анемометром с волоконно-оптическим датчиком. Доплеровский сдвиг частоты высокочастотного сигнала измерялся на анализаторе спектра. В каждой точке газожидкостного потока набиралась статистика значений скорости порядка 130 измерений. Среднее значение скорости определялось как математическое ожидание от статистического ансамбля. Следует отметить трудности при разделении электронных сигналов от различных межфазных границ в газожидкостном потоке. Поэтому измерения скорости газовой фазы проведены в два этапа. На первом этапе проведены интегральные измерения без дифференциации поверхностной раздела газовой фазы. На втором этапе измерения проводились с применением специального электронного логического блока, который позволял выделить передний или задний фронт снарядов газожидкостного потока, пузырьки в пробках и перемычки внутри тела снаряда.

На рис. 4 приведена зависимость интегральной скорости газовой фазы на оси трубы (U_0) от расхода газа. В пузырьковом режиме при малых расходах газа (до $Q \sim 0,02$ л/с) скорость пузырьков на оси трубы почти не изменяется и составляет $\sim 0,42$ м/с. Дальнейшее увеличение расхода газа приводит к росту U_0 до максимума, при оптимальном режиме газлифта ее скорость составляет 1,41 м/с. Увеличение скорости U_0 коррелирует с ростом концентрации газа на оси трубы.

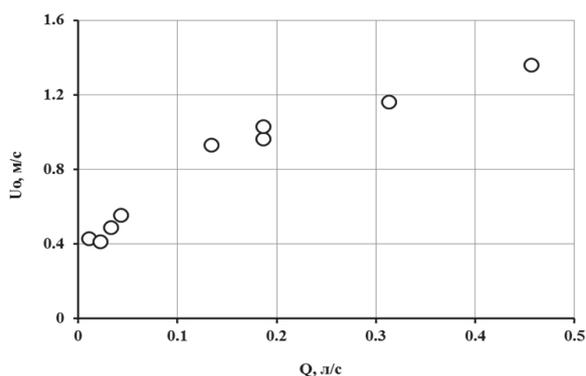


Рис. 4. Зависимость интегральной скорости газовой фазы на оси трубы от расхода газа

Fig. 4. Dependence of integral velocity of the gas phase on the tube axis on the gas flow rate

На рис. 5 показаны профили интегральной скорости газовой фазы при оптимальном режиме газлифта ($Q=0,45$ л/с), в области снарядного режима при $Q=0,045$ л/с, и при пузырьковом режиме

($Q=0,0035$ л/с). По оси абсцисс отложено относительное расстояние r/R от стенки трубы, где $R=8$ мм – радиус трубы. В пузырьковом режиме их скорость в центральной области трубы практически постоянна и составляет $0,4$ м/с. В пристенной области ($r/R < 0,2$) наблюдается уменьшение их скорости до $\sim 0,3$ м/с под влиянием стенки трубы. При снарядном режиме интегральная скорость газовой фазы имеет максимум ($U=0,655$ м/с) при $r/R=0,37$, на оси трубы $U_0=0,54$ м/с, а в пристенной области $U=0,49$ м/с.

При оптимальном режиме газлифта профиль скорости газовой фазы имеет особенность при $r/R=0,1$, что, по-видимому, связано со знакопеременной скоростью жидкой фазы в этой области и гравитационным стеканием пленки жидкости, окружающей снаряды ($U=0,99$ м/с). В центральной области потока скорость плавно увеличивается до $U_0=1,41$ м/с.

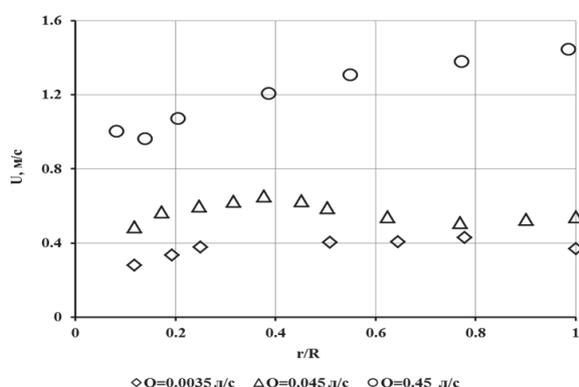


Рис. 5. Профили скорости газовой фазы при пузырьковом режиме ($Q=0,0035$ л/с), снарядном режиме ($Q=0,045$ л/с) и оптимальном газлифте ($Q=0,45$ л/с)

Fig. 5. Gas phase velocity profiles for the bubble flow ($Q=0,0035$ l/s), slug flow ($Q=0,045$ l/s), and optimal gas lift ($Q=0,45$ l/s)

На втором этапе проведено разделение сигналов от межфазных границ разного рода с помощью специального логического модуля, в алгоритме применялись характерные признаки для выделения заданного высокочастотного сигнала. На рис. 6 показаны профили скорости различных межфазных границ для снарядного режима газлифта при $Q=0,045$ л/с. Для сравнения на графике показан профиль интегральных скоростей газовой фазы (точки 4). Скорость малых пузырьков в прослойках жидкости между снарядами практически постоянна по сечению трубы и составляет $0,3$ м/с. Передняя и задняя границы снаряда имеют постоянную скорость в центральной области потока ($U \sim 0,5$ м/с) до $r/R=0,4$. В переходной зоне скорость переднего фронта замедляется, а заднего, наоборот, ускоряется под действием стекающей пленки жидкости, образующей стенки снаряда. Таким образом, в центральной области трубы скорости всех межфазных границ, за исключением мелких пузырьков, одинаковы.

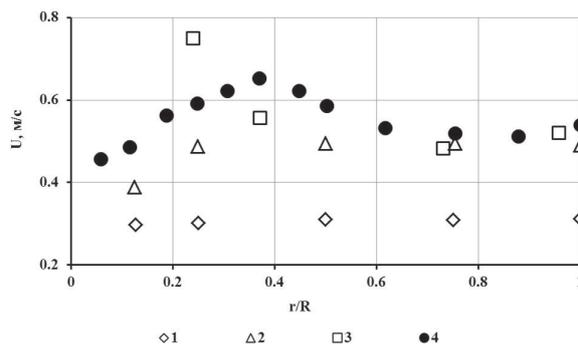


Рис. 6. Профили скорости различных межфазных границ для снарядного режима потока ($Q=0,045$ л/с): 1 – пузырьки в пробках, 2 – передний фронт снаряда, 3 – задний фронт снаряда, 4 – интегральная скорость газовой фазы

Fig. 6. Velocity profiles of different interphase boundaries for a slug flow ($Q=0,045$ l/s): 1 are the bubbles in a plug, 2 is the front border of a slug, 3 is the bottom border of a slug, 4 is the integral velocity of the gas phase

Профили локальной концентрации газовой фазы

На рис. 7 показана зависимость газосодержания на оси трубы Φ_0 от расхода газа. В начальный период при увеличении расхода газа Q до $0,1$ л/с наблюдается быстрый рост концентрации до $\sim 0,60$. При дальнейшем увеличении расхода до $0,5$ л/с концентрация газа на оси трубы монотонно растет до $0,83$. Для сравнения на графике показаны результаты измерения концентрации газа на оси трубы методом электропроводности (точки 2) в трубе диаметром 15 мм и длиной 6000 мм [24]. Очевидно, что измерения концентрации газа двумя методами показали одинаковые результаты. Следует отметить, что непрерывное увеличение концентрации при больших расходах газа соответствует относительному снижению эффективности газлифта.

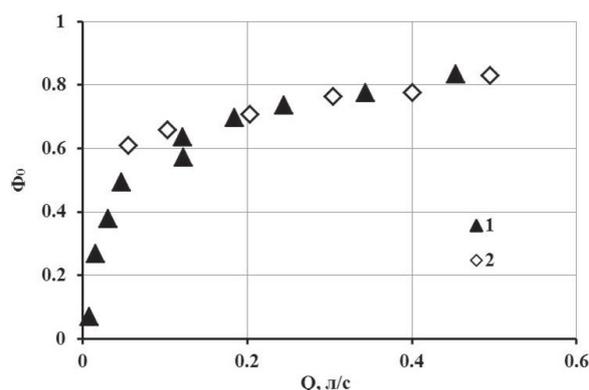


Рис. 7. Концентрация на оси трубы (Φ_0) в зависимости от расхода газа: 1) $l=2700$ мм, $d=16$ мм; 2) $l=6000$ мм, $d=15$ мм

Fig. 7. Concentration on the tube axis (Φ_0) depending on gas flow rate: 1) $l=2700$ mm, $d=16$ mm; 2) $l=6000$ mm, $d=15$ mm

На рис. 8 приведены профили локальной концентрации при различных расходах газа, соответ-

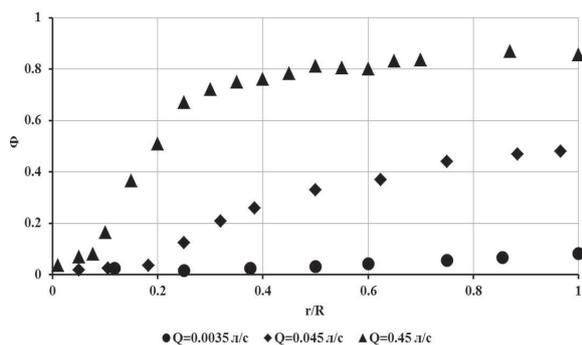


Рис. 8. Профили локальной концентрации газа при различных режимах газлифта: ● – пузырьковый, ◆ – снарядный, ▲ – оптимальный

Fig. 8. Profiles of local gas concentration for different regime of the gas lift: ● is the bubble regime, ◆ is the slug regime, ▲ is the optimal gas lift

ствующих пузырьковому (0,0035 л/с), снарядному (0,045 л/с) и началу дисперсно-кольцевого режима течения в трубе (0,45 л/с). Можно выделить три характерные зоны. В области непосредственной близости от стенки ($r/R < 0.1$) концентрация газа минимальна и при оптимальном газлифте составляет 0,05. Это область знакопеременного течения, в которой жидкая перемычка между снарядами движется вверх, а гравитационная пленка, образующая стенки снаряда, стекает вниз. В центральной области ($r/R = 0,3-1,0$) для всех трех режимов течения концентрация газа плавно увеличивается к центру трубы. Максимальная концентрация газа на оси составляет: 0,08 – для пузырь-

кового режима, 0,49 – для снарядного режима, 0,83 – для оптимального режима газлифта. В переходной области между пристенной и центральной зонами концентрация газа резко увеличивается.

Заключение

Проведено исследование эффективности газлифта и структуры газожидкостного потока в вертикальной трубе с помощью лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком. Показано, что максимальная эффективность газлифта соответствует в основном области перехода к снарядно-кольцевому режиму течения.

В поперечном сечении газожидкостного потока можно выделить три характерных зоны: центральную, пристенную и переходную между ними. В отличие от пристенной зоны с минимальными значениями параметров, скорость и концентрация газовой фазы резко возрастают в переходной зоне, затем они плавно увеличиваются до максимума в центральной зоне трубы.

Снарядный режим течения при газлифте является основным, жидкость поднимается в пробках между газовыми снарядами. Скорости верхней и нижней стенок снаряда одинаковы в центральной области трубы, но в переходной зоне скорость переднего фронта замедляется, а заднего, наоборот, ускоряется под действием стекающей пленки жидкости, образующей стенки снаряда. Скорость мелких пузырьков в пробках одинакова в центральной и переходной зонах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 14–19–01685, ведущий ученый – Маркович Д.М.) через ИТ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багдасаров В.Г. Теория, расчет и практика эргазлифта / под ред. И.Г. Есьмана. – М.; Л.: Гостоптехиздат, 1947. – 371 с.
2. Арманд А.А., Невструева Е.И. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе // Изв. ВТИ. – 1950. – № 2. – С. 1–8.
3. Бэтчелор Дж.К. Введение в динамику жидкости. – М.: Мир, 1973. – 758 с.
4. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
5. Гриффитс П., Уоллис Г. Двухфазное снарядное течение // Теплопередача. – 1961. – Т. 83. – № 3. – С. 99–114.
6. Pickert F. The theory of air-lift pump // Engineering. – 1932. – V. 134. – P. 19–20.
7. Крылов А.П. Потери трения и скольжения при движении жидкости и газа по вертикальным трубам // Нефтяное хозяйство. – 1935. – № 8. – С. 35–42.
8. Nicklin D.J., Wilkes M.A., Davidson J.F. Two-phase flow in vertical tubes // Trans. Inst. Chem. Eng. – 1962. – V. 40. – № 1. – P. 61–68.
9. Coe S.J. Гидродинамика многофазных систем. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
10. Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I. Turbulence structure of air-water bubbly flow // Int. J. Multiphase Flow. – 1975. – V. 2. – P. 235–246.
11. Herringe R.A., Davis M.R. Structural development of gas-liquid mixture flows // Journal Fluid Mech. – 1976. – V. 73. – P. 97–123.
12. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Kozmenko B.K. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small diameter vertical pipe // Int. J. Multiphase Flow. – 1986. – V. 12. – № 3. – P. 337–355.
13. Похвалов Ю.Е., Субботин В.И. Статистические параметры снарядного двухфазного течения // Теплоэнергетика. – 1988. – № 2. – С. 28–33.
14. Mao Z.-S., Dukler A.E. An experimental study of gas-liquid slug flow // Experiments in Fluids. – 1989. – V. 8. – P. 169–182.
15. Константинов Н.Н. Гидравлика двухфазного потока и ее применение к расчетам эрлифтов, гидравлических затворов и циркуляции в вертикально-водотрубных паровых котлах // Исследование и применение нефтепродуктов / под ред. Н.Г. Пучкова. – Л.: Гостоптехиздат, 1950. – С. 260–297.
16. Методы и результаты экспериментального исследования закономерностей движения газо-нефтяной смеси в условиях реальной фонтанной скважины / Д. Аузбаев, А.И. Башкиров, Ю.Н. Васильев, Р.А. Максудов // Нефтяное хозяйство. – 1961. – № 12. – С. 38–40.
17. Движение газожидкостных смесей в трубах / В.А. Мамаев, Г.Э. Одишария, О.В. Клапчук, А.А. Точигин, Н.И. Семенов. – М.: Недра, 1978. – 270 с.
18. Энциклопедия Эрлифтов / Ф.А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, А.П. Кононенко. – М.: Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.
19. Stifeev F. Research of the regimes of air-lift use to lift the pulp of high density // Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. – 2014. – V. 107. – № 3. – P. 89–95.

20. Ebrahimi A., Khomehchi E. Developing a novel workflow for natural gas lift optimization using advanced support vector machine // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – V. 28. – P. 626–638.
21. Hanafizadeh P., Raffiee A.H., Saidi M.H. Experimental investigation of characteristic curve for gas-lift pump // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2014. – V. 116. – P. 19–27.
22. Assessment of total oil production in gas-lift process of wells using Box–Behnken design of experiments in comparison with traditional approach / M. Behjoomanesh, M. Keyhani, E. Ganjiazad, M. Izadmehr, S. Riahi // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2015. – V. 27 (3). – P. 1455–1461.
23. Shao W., Boiko I., Al-Durra A. Plastic bag model of the artificial gas lift system for slug flow analysis // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – V. 33. – P. 573–586.
24. Customization of an optical probe device and validation of a signal processing procedure to study gas-liquid-solid flows. Application to a three-phase internal-loop gas-lift Bioreactor / A. Mota, A. Ferreira, A.A. Vicente, P. Sechet, J.M.F. Martins, J.A. Teixeira, A. Cartellier // *Chemical Engineering Science*. – 2015. – V. 138. – P. 814–826.
25. Mahdiani M.R., Khomehchi E. Stabilizing gas lift optimization with different amounts of available lift gas // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2015. – V. 26. – P. 18–27.
26. Drandev S., Penev K.I., Karamanov D. Study of the hydrodynamics and mass transfer in a rectangular air-lift bioreactor // *Chemical Engineering Science*. – 2016. – V. 146. – P. 180–188.
27. Modeling of flow splitting for production optimization in offshore gas-lifted oil fields: Simulation validation and applications / T.L. Silva, E., Camponogara A.F. Teixeira, S. Sunjerga // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2015. – V. 128. – P. 86–97.
28. Кашинский О.Н., Горелик Р.С., Козьменко Б.К. Экспериментальное исследование модели газлифтного подъемника для наклонно-направленных скважин // ВИНТИ, № 01830063199: отчет НГУ. – Новосибирск, 1983. – 75 с. (промежуточный).
29. Экспериментальное исследование модели газлифтного подъемника для наклонно-направленных скважин / А.Р. Евсеев, О.Н. Кашинский, С.А. Тачков, Л.С. Тимкин // ВИНТИ, № 01830036722: отчет НГУ. – Новосибирск, 1984. – 78 с. (заключительный).
30. Кашинский О.Н. Локальные гидродинамические характеристики двухфазных газожидкостных потоков: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Новосибирск, 1994. – 331 с.
31. Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Рандин В.В. Трение на стенке в восходящем снарядном течении в вертикальной трубе // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2006. – Т. 13. – № 3. – С. 411–416.
32. Kashinsky O.N., Randin V.V., Chinak A.V. Heat transfer and shear stress in gas-liquid flow in an inclined flat channel // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2014. – V. 23. – Iss. 1. – P. 39–46.
33. Лазерный доплеровский измеритель скорости непрозрачных потоков жидкости и частиц / В.Н., Лисицин В.А. Орлов, Ю.Н. Фомин, В.П. Чеботаев // *Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности: Труды III Всесоюз. совещания*. – Новосибирск, 1980. – С. 41–46.
34. Евсеев А.Р. Лазерный доплеровский измеритель скорости со световодом // *Автометрия*. – 1982. – № 3. – С. 109–111.
35. Дубинцев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. – М.: Наука, 1982. – 304 с.
36. Измерение структурных характеристик газожидкостного потока лазерным анемометром с волоконным световодом / А.Р. Евсеев, В.Е. Накоряков, Б.Г. Покусаяев, С.А. Тачков, Л.С. Тимкин // *Автометрия*. – 1987. – № 2. – С. 69–73.
37. Тачков С.А. ЛДИС с оптиковолоконным зондом для измерения скорости в газожидкостном потоке // *Газожидкостные течения: Сборник научных трудов / под ред. В.Г. Гасенко, М.С. Искакова*. – Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1990. – С. 91–102.
38. Евсеев А.Р. Экспериментальное исследование локальной структуры турбулентных двухфазных потоков с высокой концентрацией дисперсной фазы: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2013. – 299 с.
39. Bubble velocity, diameter, and void fraction measurements in a multiphase flow using fiber optic reflectometer / H-J. Lim, K-An. Chang, Ch.B. Su, Chi-Y. Chen // *Rev. Sci. Instrum.* – 2008. – V. 79. – P. 125105 (1–11).
40. Optical fiber probe to measure local void fraction profiles / D. Morris, A. Teysseidou, J. Lapierre, A. Tapucu // *Appl. Optics*. – 1987. – V. 26 (21). – P. 4660–4664.

Поступила 24.10.2016 г.

Информация об авторах

Евсеев А.Р., доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 532.529.5

EXPERIMENTAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW IN VERTICAL TUBE IN GAS LIFT MODE**Aleksey R. Evseev,**

evseev@itp.nsc.ru; evseev_ar39@mail.ru

Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

Relevance. The problem of robust design of gas lift is now very important in connection with the widespread use of this method for oil production, development of airlifts to transport pulp, mineral extraction from the seabed and other applications. The action mechanism of gas lift systems is not entirely clear, since it is held under complex conditions, at different orientations of pipe and long lengths, with variable physical properties of the phases in the changing flow regimes.

The main aim of the study is the experimental investigation of gas-liquid flow in vertical tube (gas lift regime), using a laser Doppler anemometer with optical fiber probe, measurement of velocity and concentration profiles in the tube cross section.

The research methods: Laser Doppler anemometer with optical fiber probe to measure velocity and concentration profiles of a gas phase in the tube cross section.

The results. The author has studied the efficiency of gas lift and gas-liquid flow structure in a vertical pipe employing a laser Doppler anemometer with fiber-optical probe. Three specific zones can be distinguished in the cross section of the gas-liquid flow. In contrast to the wall area with minimum values of the parameters, the velocity and concentration of the gas phase in the transition zone are increasing sharply, further they are increasing smoothly to a maximum in the central zone. The gas lift is characterized mainly by slug regime, the liquid rises in the plugs between the large bubbles. Velocity of the large bubbles top and bottom borders in the central zone of tube is the same, but in the transition zone the velocity of the top border slows down, while at the bottom border, on the contrary, it is accelerated by falling liquid film. The velocity of small bubbles in the center and transition zones is the same.

Key words:

Gas lift, slug regime of flow, large bubbles, concentration and velocity of gas phase, laser Doppler anemometer with optical fiber probe.

This research was financially supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 14–19–01685, supervised by Prof. Markovich D.M.).

REFERENCES

1. Bagdasarov V.G. *Teoriya, raschet i praktika gazlifta* [Theory, calculation and practice of gas lift]. Ed. by I.G. Esmann. Moscow; Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1947. 371 p.
2. Armand A.A., Nevstrueva E.I. Issledovanie mekhanizma dvizheniya dvukhfaznoy smesi v vertikalnoy trube [Investigation of the mechanism of a two-phase mixture movement in a vertical tube]. *Izv. VTI*, 1950, no. 2, pp. 1–8.
3. Batchelor G.K. *Vvedenie v dinamiku zhidkosti* [Introduction to fluid dynamics]. Moscow, Mir Publ., 1973. 758 p.
4. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moscow, Energy, 1976. 296 p.
5. Griffiths P., Wallis G. Dvukhfaznoe snaryadnoe techenie [Two-phase slug flow]. *Teploperedacha*, 1961, vol. 83, no. 3, pp. 99–114.
6. Pickert F. The theory of air-lift pump. *Engineering*, 1932, vol. 134, pp. 19–20.
7. Krylov A.P. Poteri treniya i skolzheniya pri dvizhenii zhidkosti i gaza po vertikalnym trubam [Losses of friction and slip at fluid and gas motion through a vertical pipe]. *Neftyanoe khozyaistvo*, 1935, no. 8, pp. 35–42.
8. Nicklin D.J., Wilkes M.A., Davidson J.F. Two-phase flow in vertical tubes. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 1962, vol. 40, no. 1, pp. 61–68.
9. Soo S.L. *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem* [Fluid dynamics of multiphase systems]. Moscow, Mir Publ., 1971. 536 p.
10. Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I. Turbulence structure of air-water bubbly flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 1975, vol. 2, pp. 235–246.
11. Herringe R.A., Davis M.R. Structural development of gas-liquid mixture flows. *Journal Fluid Mech*, 1976, vol. 73, pp. 99–123.
12. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Kozmenko B.K. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small diameter vertical pipe. *Int. J. Multiphase Flow*, 1986, vol. 12, no. 3, pp. 337–355.
13. Pokhvalov Yu.E., Subbotin V.I. Statisticheskie parametry snaryadnogo dvukhfaznogo techeniya [Statistical parameters of slug two-phase flow]. *Teploenergetika*, 1988, no. 2, pp. 28–33.
14. Mao Z.-S., Dukler A.E. An experimental study of gas-liquid slug flow. *Experiments in Fluids*, 1989, vol. 8, pp. 169–182.
15. Konstantinov N.N. Gidravlika dvukhfaznogo potoka i ee primeneniye k rashchetam erliftov, gidravlicheskiy zatvorov i tsirkulyazii v vertikalno-vodotrubnykh parovykh kotlakh [Hydraulic two-phase flow and its application for calculation of airlifts, hydraulic gates and circulation in vertical tube steam boilers]. *Issledovanie i primeneniye nefteproduktov* [Investigation and application of oil products]. Ed. by N.G. Puchkov. Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1950. pp. 260–297.
16. Auzbaev D., Bashkirov A.I., Vasilev Yu.N., Maksutov R.A. Metody i rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya zakonomernostey dvizheniya gaso-neftyanoy smesi v usloviyakh realnoy fontanoy skvazhiny [Methods and results of the experimental study of motion laws of gas-oil mixture in a real flow of the fountain bore]. *Neftyanoe khozyaistvo*, 1961, no. 12, pp. 38–40.
17. Mamaev V.A., Odishariya G.E., Klapchuk O.V., Tochigin A.A., Semenov N.I. *Dvizhenie gasozhidkostnykh smesey v trubakh* [Movement of gas-liquid mixtures in pipes]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 270 p.
18. Papayani F.A., Kozyryatsky L.N., Pashchenko V.S., Kononenko A.P. *Entsiklopediya Erliftov* [Encyclopedia of airlifts]. Moscow, Informsvyazizdat Publ., 1995. 592 p.
19. Stifeev F. Research of the regimes of air-lift use to lift the pulp of high density. *Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2014, vol. 107, no. 3, pp. 89–95.

20. Ebrahimi A., Khamehchi E. Developing a novel workflow for natural gas lift optimization using advanced support vector machine. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 28, pp. 626–638.
21. Hanafizadeh P., Raffiee A.H., Saidi M.H. Experimental investigation of characteristic curve for gas-lift pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, vol. 116, pp. 19–27.
22. Behjoomanesh M., Keyhani M., Ganji-azad E., Izadmehr M., Riahi S. Assessment of total oil production in gas-lift process of wells using Box–Behnken design of experiments in comparison with traditional approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 27 (3), pp. 1455–1461.
23. Shao W., Boiko I., Al-Durra A. Plastic bag model of the artificial gas lift system for slug flow analysis. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 33, pp. 573–586.
24. Mota A., Ferreira A., Vicente A.A., Sechet P., Martins J.M.F., Teixeira J.A., Cartellier A. Customization of an optical probe device and validation of a signal processing procedure to study gas–liquid–solid flows. Application to a three-phase internal-loop gas-lift Bioreactor. *Chemical Engineering Science*, 2015, vol. 138, pp. 814–826.
25. Mahdiani M.R., Khamehchi E. Stabilizing gas lift optimization with different amounts of available lift gas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 26, pp. 18–27.
26. Drandev S., Penev K.I., Karamanev D. Study of the hydrodynamics and mass transfer in a rectangular air-lift bioreactor. *Chemical Engineering Science*, 2016, vol. 146, pp. 180–188.
27. Silva T.L., Camponogara E., Teixeira A.F., Sunjerga S. Modeling of flow splitting for production optimization in offshore gas-lifted oil fields: Simulation validation and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, vol. 128, pp. 86–97.
28. Kashinsky O.N., Gorelik R.S., Kozmenko B.K. *Ekspierimentalnoe issledovanie modeli gazliftnogo podemnika dlya naklonno-napravlennykh skvazhin* [Experimental study of gas lift model for directional wells]. VINITI no. 01830063199: otchet NGU. Novosibirsk, 1983. 75 p.
29. Evseev A.R., Kashinsky O.N., Tachkov S.A., Timkin L.S. *Ekspierimentalnoe issledovanie modeli gazliftnogo podemnika dlya naklonno-napravlennykh skvazhin* [Experimental study of gas-lift model for directional wells]. VINITI no. 01830036722: NGU. Novosibirsk, 1984. 75 p.
30. Kashinsky O.N. *Lokalnye gidrodinamicheskie kharakteristiki dvukhfaznykh gasozhidkostnykh potokov*. Dis. Dokt. nauk [Local hydrodynamic parameters of gas-liquid two-phase flows. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 1994. 331 p.
31. Kashinsky O.N., Kurdymov A.S., Randin V.V. Trenie na stenke v voskhodyashchem snaryadnom techenii v vertikalnoy trube [Friction at the wall in upstream slug flow in a vertical tube]. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2006, vol. 13, no. 3, pp. 411–416.
32. Kashinsky O.N., Randin V.V., Chinak A.V. Heat transfer and shear stress in gas–liquid flow in an inclined flat channel. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, vol. 23, Iss. 1, pp. 39–46.
33. Lisitsyn V.N., Orlov V.A., Fomin Yu.N., Chebotaev V.P. Lazerny doplerovskiy izmeritel skorosti neprozrachnykh potokov zhidkosti i chastits [Laser Doppler velocimeter for opaque flows of liquid and particles]. *Trudy III Vsesoyuznogo Soveshchaniya: Ekspierimentalnye metody i apparatura dlya issledovaniya turbulentnosti* [Proc III All-Union Meeting. Experimental techniques and equipment for studying turbulence]. Novosibirsk, 1980. pp. 41–46.
34. Evseev A.R. Lazerny doplerovskiy izmeritel skorosti so svetovodom [Laser Doppler anemometer with fiber]. *Avtometriya*, 1982, no. 3, pp. 109–111.
35. Dubnistchev Yu.N., Rinkyavichus B.S. *Metody lazernoy doplerovskoy anemometrii* [Methods of laser Doppler anemometry]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 304 p.
36. Evseev A.R., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Tachkov S.A., Timkin L.S. Izmerenie strukturnykh kharakteristik gasozhidkostnogo potoka lazernym anemometrom s volokonnym svetovodom [Measurement of structural characteristics of gas-liquid flow by a laser anemometer with optical fibers]. *Avtometriya*, 1987, no. 2, pp. 69–73.
37. Tachkov S.A. LDIS s optikovolokonnym zondom dlya izmereniya skorosti v gasozhidkostnom potoke [LDIS with fiber optic probe for measuring the velocity in the gas-liquid flow]. *Gazozhidkostnye techeniya. Sbornik nauchnykh trudov* [Gas-liquid flows]. Eds. V.G. Gasenko, M.S. Iskakov. Novosibirsk, SO AN SSSR, 1990. pp. 91–102.
38. Evseev A.R. *Ekspierimentalnoe issledovanie lokalnoy struktury turbulentnykh dvukhfaznykh potokov s vysokoy kontsentratsiey dispersnoy fazy*. Dis. Dokt. nauk [Experimental study of the local structure of turbulent two-phase flow with a high concentration of the dispersed phase. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2013. 299 p.
39. Lim H-J., Chang K-An., Su Ch.B., Chen Chi-Y. Bubble velocity, diameter, and void fraction measurements in a multiphase flow using fiber optic reflectometer. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, vol. 79, pp. 125105 (1–11).
40. Morris D., Teyssedou A., Lapierre J., Tapucu A. Optical fiber probe to measure local void fraction profiles. *Appl. Optics.*, 1987, vol. 26 (21), pp. 4660–4664.

Received: 24 October 2016.

Information about the authors

Aleksey R. Evseev, Dr. Sc., leading researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.