

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОВОДЯНЫХ ПОТОКОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ*

П.Л. Кириллов, Ю.Д. Левченко, Ю.Ю. Штейн, Р.В. Шумский

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



В работе изложены методики, позволяющие исследовать локальные характеристики пароводяных потоков высокого давления: распределение истинного объемного паросодержания по сечению парогенерирующего канала, линейные и массовые скорости фаз, толщины и структуры пленки жидкости на стенке и касательные напряжения. Все методики применены к развитым дисперсно-кольцевым пароводяным потокам при давлениях до 14 МПа. Разработаны и испытаны измерительные устройства для реализации этих методик.

ВВЕДЕНИЕ

Гидродинамика двухфазных потоков и теплообмен в них в значительной степени определяются взаимодействием между фазами, характером распределения скоростей фаз и истинного объемного паросодержания по сечению канала. Эти характеристики являются основой для создания теории и понимания явлений, связанных с внутренней структурой потоков.

К числу важных характеристик двухфазного потока можно отнести значения истинного объемного паросодержания, играющего особенную роль не только в общих гидродинамических процессах, но и в физике ядерных реакторов, влияя на коэффициент реактивности. Например, динамическое взаимодействие роликовых волн пленки жидкости на стенке канала с пароводяным ядром потока в значительной степени определяет распределение фаз и их скоростей по сечению канала.

Большое количество работ посвящено изучению структуры газожидкостных и пароводяных потоков. В основном они относятся либо к низким давлениям, либо охватывают ограниченный диапазон параметров. Ясно, что такие результаты не могут безоговорочно переноситься на пароводяные потоки высокого давления. Анализ существующих методов исследования подробно представлен в [1]. На основе этого анализа были выбраны методики, наиболее пригодные, по мнению авторов, для исследований пароводяных потоков высокого давления.

В данной работе для измерения истинного объемного паросодержания выбран часто использовавшийся известный метод γ -просвечивания парогенерирующего ка-

© П.Л. Кириллов, Ю.Д. Левченко, Ю.Ю. Штейн, Р.В. Шумский, 2006

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 05-08-65401).

нала. Для изучения структуры пленки жидкости на стенке канала применен традиционный электроконтактный метод. Для исследования распределения фаз и их скоростей по сечению использован метод изокинетического пробоотбора. Он был успешно применен для изучения двухкомпонентных смесей вода-аргон и спирт-аргон в трубе внутренним диаметром 25 мм при давлениях до 2.2 МПа в работе [2] и является, по мнению авторов, практически эксклюзивным методом получения данных о локальной структуре пароводяных потоков высокого давления. Поскольку при измерениях в пароводяных потоках в отличие от двухкомпонентных, имеют место фазовые переходы, искажающие истинный фазовый состав отобранной двухфазной смеси, в настоящей работе использовался усовершенствованный изокинетический зонд, оснащенный адиабатным сепаратором фаз.

Важным интегральным параметром пароводяных потоков является гидравлическое сопротивление, особенно его часть, относящаяся к потерям давления на трение. Традиционно они определялись по измеренному полному перепаду давления на некоторой длине за вычетом потерь давления на ускорение потока (за счет роста массового паросодержания) и гидростатической (нивелирной) составляющей. Эти составляющие приходилось рассчитывать либо, используя данные по истинному объемному паросодержанию, которые обычно брались из других публикаций, либо с привлечением различных допущений и предположений, не всегда обоснованных или не вполне подтвержденных экспериментально.

Прямое измерение трения на стенке канала является предпочтительным. Авторам неизвестны какие-либо методы, пригодные для измерения касательных напряжений трения в пароводяных потоках высокого давления, и выбор был сделан в пользу методики, проверенной в опытах с газожидкостными потоками [3]. Этот метод позволяет получить, независимо от других, значения среднего по сечению истинного объемного паросодержания. Расчет среднего по сечению истинного объемного паросодержания на основе данных, полученных методом изокинетического пробоотбора и с помощью τ -метра в совокупности с методом γ -просвечивания рабочего участка, при их сопоставлении позволяют получить наиболее достоверные данные.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Истинное объемное паросодержание

Для измерения истинного объемного паросодержания используется метод сканирования канала по хордам узким плоскопараллельным пучком γ -излучения. Регистрируется его интенсивность в зависимости от положения луча относительно оси рабочего участка. При этом луч перемещается от одной стенки рабочего участка к другой. Перед началом экспериментов на пароводяном потоке осуществляется сканирование порожнего рабочего участка (заполненного воздухом – интенсивность I''), затем заполненного водой при некоторой температуре t (интенсивность I'). Это несколько усложняет последующий расчет истинного объемного паросодержания, но при высоких давлениях невозможно осуществить просвечивание канала, заполненного только паром при рабочем давлении, либо только водой при температуре насыщения. После этого сканируется рабочий участок при течении в нем пароводяного потока с заданной массовой скоростью и массовым паросодержанием (интенсивность $I_{см}$). При этом полагается, что поглощение излучения в воздухе при нормальном давлении пренебрежимо мало по сравнению с таковым для пара высокого давления.

На основании полученных интенсивностей излучения вдоль хорды, находящейся на расстоянии $\xi = r/R$ от центра рабочего участка, рассчитывается среднее вдоль этой хорды истинное объемное паросодержание по соотношению:

$$\bar{\varphi}(\xi) = \frac{\rho_t}{\rho' - \rho''} \frac{\ln \frac{I_{cm}}{I'}}{\ln \frac{I''}{I'}} - \frac{\rho_t - \rho'}{\rho' - \rho''} \quad (1)$$

После чего интегрированием определяется среднее по сечению истинное объемное паросодержание, полученное методом γ -просвечивания:

$$\bar{\varphi}_\gamma = \frac{4}{\pi} \int_0^1 \sqrt{1 - \xi^2} \bar{\varphi}(\xi) d\xi \quad (2)$$

Толщина пленки жидкости на стенке канала

Электроконтактный метод использовался в [4, 5]. Принцип его основан на определении зависимости скорости счета импульсов, возникающих при касании контактной иглой пленки жидкости на стенке или ее части от расстояния до стенки. При волновой структуре пленки таким способом можно определить две величины: амплитуду волн на ее поверхности $\delta_{гр}$ (высоту гребней роликовых волн) и толщину сплошного подслоя во впадинах между волнами $\delta_{мин}$. Таким образом, пленку жидкости в общем виде можно представить, как состоящую из непрерывного жидкого подслоя $\delta_{мин}$ и возмущенного слоя $(\delta_{гр} - \delta_{мин})$. При такой структуре пленки понятие средней ее толщины является весьма условным, и у разных авторов ее трактовка различна. Чаще всего за среднюю толщину пленки принимают такое расстояние от стенки, на котором длительность контакта иглы с пленкой составляет половину измерительного временного интервала [6, 7]. Полезным является также предложенное в [4] понятие среднеинтегральной толщины пленки $\delta_{инт}$, основанное на предположении о постоянстве фазовой скорости по высоте волны в точках измерения. Эта величина получается как интеграл от статистического профиля скорости счета.

К недостаткам метода можно было бы отнести отмеченный в опытах с газожидкостными потоками гистерезис и возмущение потока иглой, но проведенное в [8] сопоставление результатов измерения толщин стекающих пленок методом контактной иглы с результатами измерений электрического сопротивления и скоростной киносъемкой показало надежность метода контактной иглы. В частности, скоростная киносъемка позволила провести наблюдение за контактным гистерезисом и установить малое влияние этого эффекта на результаты измерений. Поэтому можно полагать, что в пароводяном потоке высокого давления это явление будет еще более незначительным из-за уменьшения коэффициента поверхностного натяжения воды.

Блок-схема этого метода, которая используется в настоящем исследовании, приведена на рис. 1. Схема работает на переменном токе звуковой частоты ($f = 1$ кГц) во избежание поляризации электродов. В этой схеме в каждом положении иглы относительно стенки регулировкой усиления достигается нормализация амплитуды выходного сигнала U_{max} , контролируемой на экране осциллографа. Регистрируется скорость счета импульсов в диапа-

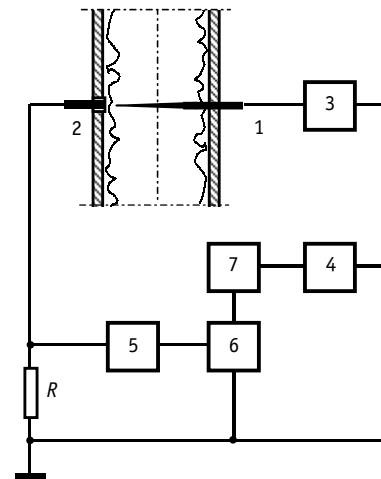


Рис. 1. Измерительная блок-схема электроконтактного зонда: 1 – игла; 2 – электрод; 3 – генератор ЗЧ; 4 – счетчик; 5 – фильтр частотный; 6 – осциллограф С1-18; 7 – блок согласующий; R – резистор нагрузочный

зоне амплитуд от порога срабатывания схемы до U_{\max} .

По зависимости скорости счета импульсов от расстояния иглы от стенки делается заключение о той или иной геометрической характеристике пленки.

Исследование распределения фаз по сечению методом изокINETического пробоотбора

Методика изокINETического пробоотбора [1] основана на измерении профиля динамического давления двухфазной смеси $P_{\text{дин}}$ при отсутствии пробоотбора (при этом зонд действует, как обычная трубка Пито) и измерении профилей массовых расходов жидкой и газовой фаз через зонд. При этом должна соблюдаться изокINETичность отбора, т.е. отсутствие каких-либо искажений потока, вносимых зондом. Для контроля изокINETичности отбора вблизи входа в трубку Пито имеется отверстие, через которое осуществляется контроль разности давлений на входе в зонд и на стенке канала.

Комплекс этих двух измерений позволяет выполнить расчет профилей линейных скоростей фаз и распределения истинного объемного газосодержания. Используются следующие соотношения, связывающие перечисленные выше параметры:

$$P_{\text{дин}} = \frac{c'' W''^2 \varphi^2}{2} + \frac{c' W'^2 (1 - \varphi^2)}{2}, \quad (3)$$

$$G' = \rho' W' (1 - \varphi), \quad (4)$$

$$G'' = \rho'' W'' \varphi. \quad (5)$$

Здесь G' и G'' – приведенные массовые скорости фаз, т.е. отношения измеренных расходов жидкости и газа через зонд к его поперечному сечению.

Соотношение (3) получено в [2] на основе анализа уравнений количества движения для двухфазного потока. Отсюда следуют расчетные соотношения для истинного объемного паросодержания и линейных скоростей фаз:

$$\varphi = \frac{2\rho' \rho'' P_{\text{дин}} - \rho'' G'^2 - \rho' G''^2}{2\rho' \rho'' P_{\text{дин}} + \rho'' G'^2 - \rho' G''^2}, \quad (6)$$

$$W' = \frac{G'}{\rho' (1 - \varphi)}, \quad (7)$$

$$W'' = \frac{G''}{\rho'' \varphi}. \quad (8)$$

Если речь идет о пароводяном потоке высокого давления, то, в отличие от двухкомпонентного потока, при отборе его изокINETическим зондом неизбежно происходит изменение фазового состава отобранной пробы. Поэтому наиболее надежной для пароводяного потока представляется методика изокINETического пробоотбора с сепарацией фаз, представленная схематически на рис. 2.

При закрытых вентилях отбора 6, 7 с помощью дифманометра 11 измеря-

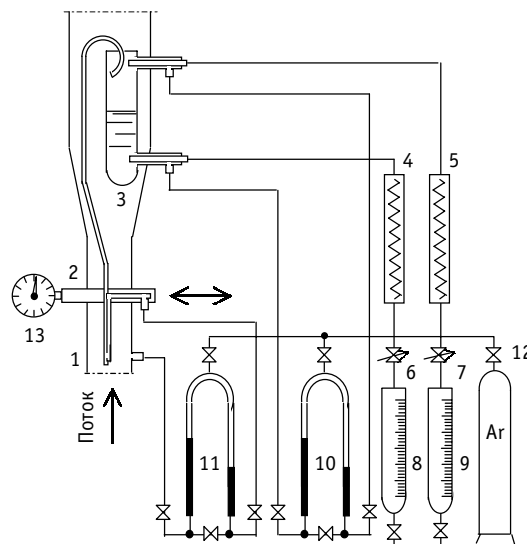


Рис. 2. Измерительная схема изокINETического зонда: 1 – рабочий элемент; 2 – шток перемещения; 3 – сепаратор фаз; 4, 5 – холодильники; 6, 7 – вентили тонкой регулировки; 8, 9 – мензурки; 10, 11 – манометры дифференциальные жидкостные (вода-аргон); 12 – баллон с аргонном; 13 – индикатор перемещения зонда

ется динамическое давление потока. При открытых вентилях 6 и 7 отбираемая через зонд пароводяная смесь поступает в верхнюю часть сепаратора, который омывается самим потоком, что позволяет избежать фазовых переходов в отобранной двухфазной смеси. Регулировкой устанавливается такая скорость отбора пара из верхней части сепаратора вентилем 7, чтобы давление на входе в зонд было равно статическому давлению в канале. При этом обеспечивается условие изокINETИЧНОСТИ отбора, т.е. зонд не оказывает влияния на набегающий поток на входе. Контроль изокINETИЧНОСТИ отбора осуществляется также по дифманометру 11.

Отбор воды осуществляется из нижней части сепаратора, причем таким образом, чтобы уровень ее в сепараторе был, по возможности, постоянным (во время измерения) и не находился выше или вблизи уровня расположения отборника пара и ниже уровня отбора воды, поскольку при нарушении этих условий возможен захват воды в отборник пара в первом случае, или захват пара в отборник воды, что приведет к значительному искажению результатов измерения. Уровень воды в сепараторе отслеживается по дифманометру 10. Отобранные пар и вода поступают в холодильники 4 и 5, после которых их расходы измеряются мензурками 8 и 9 соответственно.

Адекватность измеренных зондом расходов фаз можно оценить из результатов сравнения суммарных массовых скоростей фаз, полученных интегрированием профилей G' и G'' с массовой скоростью потока по показаниям расходомера.

Измерение касательных напряжений

Метод подвижного элемента канала позволяет непосредственно измерить силу трения со стороны потока на его стенке. Идея метода состоит в том, что на подвижный элемент действует такая же сила трения со стороны потока, как и на стенку канала такой же длины.

Рассмотрим силы, действующие на подвижный элемент в адиабатном восходящем потоке на измерительной схеме, представленной на рис. 3:

- вес подвижного элемента mg ;
- сила, обусловленная полным перепадом давления потока на его длине, за счет разности давлений на торцах:

$$F_{\Delta p} = \frac{\pi g l}{4H} (D_1^2 - D^2) \times \left[\Delta h_{\text{ман}}^{\Delta p} (\rho_{\text{ман}} - \rho_{\text{Ар}}) + H \rho_{\text{ман}} \right]; \quad (9)$$

- сила, обусловленная действием касательных напряжений (сила трения) $F_{\tau} = \pi D l \tau$.

Если силы воздействия потока на подвижный элемент при заданных давлении, массовой скорости и паросодержании недостаточно или избыточно для его уравнивания, необходимо приложить к нему дополнительную балансирующую (уравнивающую) силу $\pm F_{\text{бал}}$. Для создания такой силы на наружной поверхности подвижного элемента (в его середине) выполнен выступ (скобка), позволяющий разде-

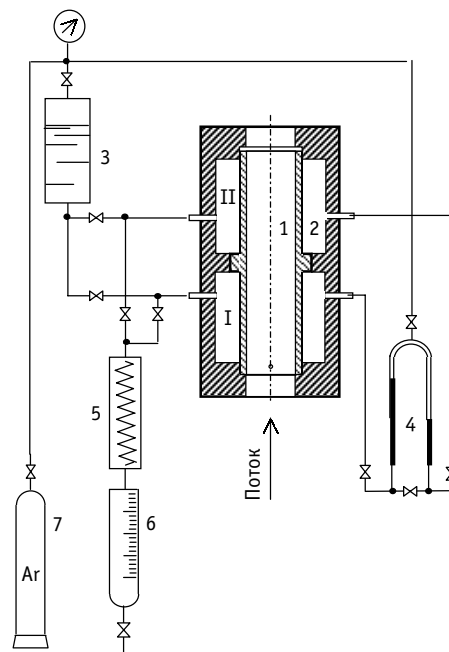


Рис. 3. Схема измерения касательных напряжений: 1 – элемент подвижный; 2 – корпус; 3 – емкость с водой; 4 – манометр дифференциальный; 5 – холодильник; 6 – мензурка; 7 – баллон с аргонem; I, II – соответственно нижняя и верхняя камеры (τ-метра)

лить полость между подвижным элементом и корпусом на две камеры – I и II. Уравновешивающую силу можно получить созданием некоторого перепада давления между этими камерами τ -метра при подаче небольшого расхода воды в камеру I или при отборе воды из камеры II (или наоборот, если подвижный элемент под воздействием потока находится в верхнем положении), и действует она на выступ (скобку) в середине наружной поверхности подвижного элемента. Эту силу можно выразить как

$$F_{\text{бал}} = \frac{\pi g}{4} (D_2^2 - D_1^2) [\Delta h_{\text{ман}} (\rho_{\text{ман}} - \rho_{\text{Ar}}) - h_{\text{ск}} \rho']. \quad (10)$$

Последний член в (10) есть не что иное, как Архимедова сила, действующая на скобку подвижного элемента в воде в камерах датчика, имеющей практически температуру насыщения.

Уравнение баланса сил при уравнивании подвижного элемента имеет вид:

$$mg - F_{\tau} - F_{\Delta P} \pm F_{\text{бал}} = 0, \quad (11)$$

и значение τ вычисляется из соотношений (9)–(11).

Эксперименты по измерению τ в адиабатном потоке позволяют вычислить также и истинное объемное паросодержание. Если пренебречь потерями давления на ускорение потока (при адиабатном течении это допустимо), то на основе измеренных полных гидравлических потерь давления и значений касательного напряжения можно вычислить среднюю плотность пароводяной смеси

$$\bar{\rho}_{\text{см}} = \frac{1}{g} \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{\text{полн}} - \frac{4\tau}{dg}, \quad (12)$$

и соответственно среднее истинное объемное паросодержание, полученное на основе измерений касательного напряжения:

$$\bar{\varphi}_{\tau} = \frac{\rho' - \bar{\rho}_{\text{см}}}{\rho' - \rho''}. \quad (13)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Экспериментальные исследования проводились на замкнутом контуре, специально спроектированном для проведения работ при высоких давлениях. Основными элементами контура были циркуляционный центробежный насос ЦН-602, подпиточный насос Т-4А, конденсатор, холодильники, система компенсаторов давления. В качестве рабочего участка использовалась труба из нержавеющей стали внутренним диаметром 17 или 13 мм и длиной 8 м. Обогрев рабочего участка осуществлялся посредством прямого пропускания через него переменного электрического тока. Суммарная электрическая мощность предварительных нагревателей и рабочего участка составляла ~550 кВт. С помощью перемещаемых по длине рабочего участка токоподводов имелась возможность изменять как длину зоны обогрева, так и ее расстояние до выхода, где располагались измерительные устройства, для определения влияния длины адиабатного участка на исследуемые параметры течения.

Измерительные устройства – изокINETический зонд, электрический зонд сопротивления и измеритель касательных напряжений (τ -метр) – были смонтированы на выходе из рабочего участка. Установка для γ -просвечивания позволяла проводить исследования как по высоте рабочего участка, так и по его сечению. Для измерения полных гидравлических потерь давления были предусмотрены отборники давления с расстоянием между ними 1 м, подсоединенные к жидкостному дифманометру и к датчикам перепада давления типа «САПФИР-22ДД».

В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода, расход которой с точностью до 2% измерялся комплексом, состоящим из турбинного расходомера типа ТДР-10, преобразователя частота/напряжение и цифрового вольтметра.

Температура по циркуляционному контуру измерялась хромель-алюмелевыми термомпарами с точностью $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Установка для γ -просвечивания

Установка сконструирована в традиционном для подобных исследований стиле, неоднократно использовавшемся многими исследователями. В качестве источника излучения использовался изотоп Tm-170 с энергией излучения ~ 63 кэВ, в качестве детектора – сцинтилляционный счетчик на основе кристалла NaJ(Tl) и фотоумножителя ФЭУ-93, помещенные в блоки со свинцовой защитой, обеспечивающие получение коллимированного узкого плоскопараллельного пучка излучения толщиной ~ 0.5 мм и высотой 12 мм. Источник излучения и детектор были смонтированы на подвижной платформе, позволяющей проводить сканирование рабочего участка как по его радиусу, так и в различных положениях по высоте от входа в зону обогрева до выхода из нее. В целях стабилизации теплового режима работы фотоумножителя и сцинтиллятора блок детектора был снабжен рубашкой охлаждения, омываемой проточной водой.

Сигнал с выхода фотоумножителя после предварительного усиления и нормализации поступал на амплитудный анализатор, а с него на интенсиметр, выходное напряжение которого регистрировалось самопишущим потенциометром.

Установкой ширины окна пропускания анализатора и его положения на статистической кривой спектра можно было в процессе калибровочных экспериментов подобрать диапазон амплитуд импульсов, при котором чувствительность метода (отношение интенсивностей излучения на воде и воздухе) была наибольшей. Это было необходимо вследствие сильного ослабления мягкой части спектра излучения стенками трубы и, как результат, значительной потери чувствительности и соответственно точности метода.

Электроконтактный зонд для измерения толщины пленки

С конструктивной точки зрения электроконтактный зонд особых отличий от прототипов не имел, в силу этого его описание в данной работе не представлено. Конструктивные доработки касались лишь использования его при высоких давлениях и температурах.

Основным элементом этого зонда служила перемещающаяся с помощью винтового механизма игла. Игла была изготовлена из сплава вольфрама с ниобием (ВН2) и покрыта путем напыления на плазменной установке изолирующим слоем оксида алюминия с последующим его отжигом. Она фиксировалась и уплотнялась в специальной головке с помощью набора тонких чередующихся прокладок из фторопласта и паронита. Перемещение иглы осуществлялось вручную с отсчетом ее положения по индикатору часового типа с точностью ± 0.01 мм.

Настенный электрод представлял собой металлический стержень диаметром 2.5 мм, изолированный от стенки втулкой из талькохлорита и также с соответствующим уплотнением. Данная конструкция зонда позволила уверенно проводить исследования пленки при давлениях до 14 МПа.

Изокинетический пробоотборник

Устройство изокинетического пробоотборника показано на рис. 4. Рабочий элемент зонда является трубка Пито, изготовленная из капилляра внутренним диаметром 1 мм, которая перемещается по диаметру канала с помощью штока перемещения, расположенного в корпусе и связанного с приводным сервомеханизмом. Вблизи входа в трубку Пито на технологически доступном расстоянии (~1.8 мм) выполнено небольшое (диаметром ~0.2 мм) отверстие, через которое производится отбор давления внутри зонда, которое с помощью другого капилляра, приваренного к трубке Пито лазерной сваркой, через отборник давления подсоединяется к дифманометру 11 (см. рис. 2). Другой вход этого дифманометра соединен с отборником давления, выполненным на стенке канала на том же уровне, что и входное отверстие зонда. С помощью этого дифманометра измеряется профиль динамического давления пароводяной смеси и контроль изокинетичности отбора. Уплотнение рабочего элемента осуществляется в штоке перемещения с помощью набора медных прокладок специальной формы из отожженной меди.

Положение зонда в канале фиксируется индикатором часового типа с точностью ± 0.01 мм. Наблюдение за индикатором осуществляется дистанционно с помощью телевизионной установки.

Сепаратор, имеющий в нижней части обтекаемую форму, расположен в специальном корпусе, состыкованном с корпусом зонда через никелевую прокладку. Отобранная зондом пароводяная смесь входит в верхнюю часть сепаратора. Сепаратор оснащен штуцерами для подсоединения к дифманометру измерения уровня воды в нем и штуцерами для отбора пара из верхней его части и воды в нижней.

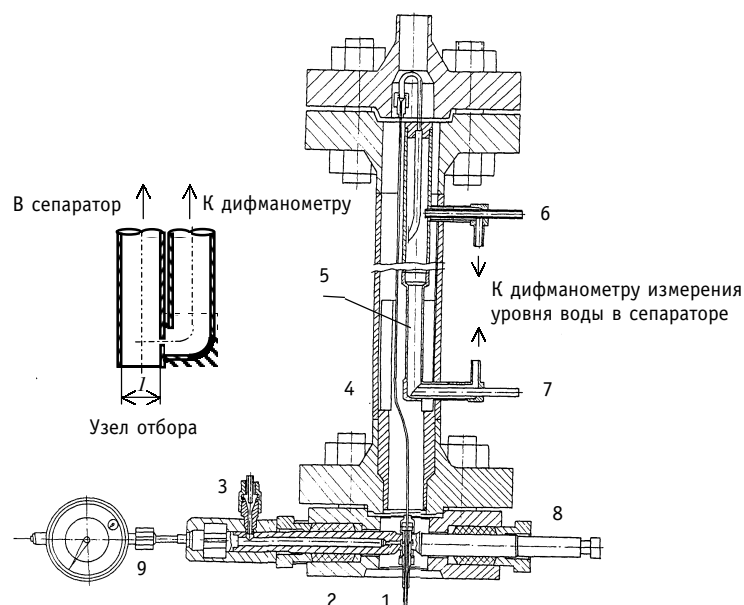


Рис. 4. Изокинетический зонд с сепаратором фаз: 1 – узел отбора; 2 – корпус; 3 – штуцер отбора давления в зонде; 4 – корпус сепаратора; 5 – сепаратор; 6 – штуцер отбора пара; 7 – штуцер отбора воды; 8 – шток перемещения; 9 – индикатор перемещения

Устройство для измерения касательных напряжений (τ-метр)

Конструкция τ-метра, к примеру, для рабочего участка диаметром 13 мм приведена на рис. 5. Основными деталями его являются цилиндрический подвижный (плавающий) элемент с внутренним диаметром, как и у рабочего участка и корпус, в ко-

тором он размещается в трех направляющих с зазорами ~ 20 мкм. Подвижный элемент имел возможность перемещаться вверх или вниз на 1 мм. Для рабочего участка внутренним диаметром 13 мм, к примеру, длина подвижного элемента 75 мм, а его масса 19.47 г. Для рабочего участка диаметром 17 мм соответственно 100 мм и 49.81 г. Корпус и подвижный элемент были изготовлены из нержавеющей стали одной марки, чтобы исключить его заклинивание вследствие температурного расширения.

Посередине подвижного элемента имеется кольцевой цилиндрический выступ (скобка), разделяющий внутреннюю полость корпуса на две камеры I и II. Они соединены с дифманометром и с системой подачи в них специально подготовленной дистиллированной воды из емкости, находящейся под давлением аргона или отбора из них воды. В последнем случае расход отбираемой из потока воды после охлаждения в холодильнике можно было измерять по времени заполнения мензурки.

Для упрощения измерений были изготовлены несколько вариантов подвижных элементов с разной массой за счет увеличения высоты скобки.

В отличие от прототипа, использованного в [2], в настоящей работе необходимо было отказаться, ввиду высоких давлений и температур, от смотрового окошка для визуального наблюдения за подъемом подвижного элемента при достижении баланса действующих на него сил. Для фиксации всплытия подвижного элемента в данной работе в его нижней части в пределах высоты нижней направляющей были просверлены четыре отверстия диаметром 1 мм так, чтобы при всплытии его внутренняя полость сообщалась с камерой I. При этом стало возможным фиксировать наступление баланса сил по дифманометру.

КАЛИБРОВОЧНЫЕ ОПЫТЫ

Калибровочные опыты были проведены с целью проверки работоспособности измерительных устройств с конструктивной и методической точек зрения. Эти опыты включали в себя

- исследование профиля динамического давления и профиля расхода в однофазном потоке изокинетическим зондом;
- измерение балансирующей силы в опытах с τ -метром, заполненным воздухом и водой в статических условиях ($\tau = 0$);
- измерение касательных напряжений в однофазном потоке воды.

В этих опытах балансирующая сила создавалась плавной непрерывной инъекцией дистиллированной воды в нижнюю камеру τ -метра. В результате перепад давления между камерами возрастал до наступления равновесия сил, действующих на подвижный элемент. В этот момент подвижный элемент всплывал, и рост перепада давления прекращался в результате соединения полости камеры с потоком через

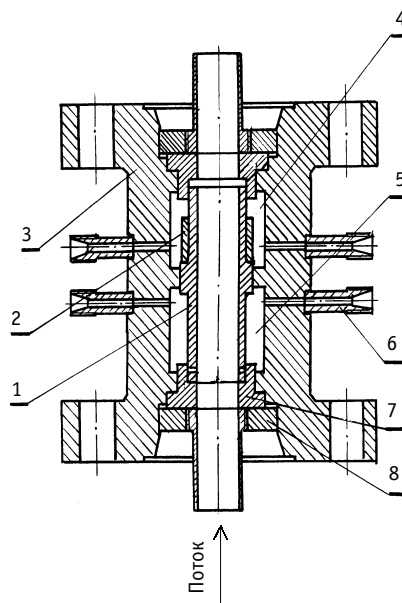


Рис. 5. Конструкция устройства для измерения касательных напряжений (τ -метра): 1 – подвижный элемент трубы; 2 – грузик; 3 – корпус; 4 – камера верхняя; 5 – камера нижняя; 6 – штуцеры подсоединительные; 7 – направляющая; 8 – кольцо запорное

отверстия в нижней части подвижного элемента при подъеме его на 0.5 мм. Значение перепада давления в этот момент использовалось для расчета $F_{\text{бал}}$ и τ . Такая же процедура измерения балансирующей силы в случае $\tau = 0$ подачей воздуха в заполненный воздухом τ -метр позволяет из соотношения (4) определить вес подвижного элемента, сравнить его со значением, полученным непосредственным взвешиванием и, таким образом, оценить силу трения в направляющих.

На основе проведенных калибровочных опытов можно сделать следующие заключения.

1. Профили линейной скорости воды, измеренные изокINETическим зондом, динамического давления и расходов согласуются между собой и с рассчитанными по модели Кармана в пределах $\pm 3\%$.

2. Величина силы трения в направляющих подвижного элемента (0.001 Н).

3. Силой инерции подвижного элемента можно пренебречь.

4. Максимальный расход воды, подаваемый в нижнюю камеру τ -метра (камеру I) не превышает 1% от основного расхода среды на входе в рабочий участок и значительно падает с ростом касательного напряжения.

5. Касательные напряжения, измеренные в потоке воды, согласуются с расчетами по формуле Блазиуса в пределах $\pm 3\%$.

Предварительные оценки показывают, что ожидаемая относительная погрешность измерения расходов фаз составляет 5% для пара и 3% для воды. Неточность в поддержании изокINETичности отбора, при разнице давлений на входе в зонд и на стенке рабочего участка, специально доводилась до ± 200 Па. Это соответствовало разности уровней в жидкостном дифманометре, по которому контролируется отбор пара, в пределах $20 \div 26$ мм в зависимости от давления. При этом ошибка измерения расхода пара всего в 1.5% не оказывала заметного влияния на измерение расхода воды, вследствие большого импульса ее по сравнению с паром. Все это, разумеется, справедливо до определенных давлений, когда плотности фаз еще довольно сильно отличаются, что выполняется при давлениях до 14 МПа.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

Латинские буквы

D – внутренний диаметр подвижного элемента, м;

D_1 – наружный диаметр подвижного элемента, м;

D_2 – наружный диаметр выступа на стенке подвижного элемента, м;

G – массовая скорость, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$;

h – высота, м;

H – расстояние между отборниками давления на рабочем участке, м;

l – длина подвижного элемента, м;

L – длина, м;

m – масса подвижного элемента, кг;

P – давление, Па;

W – линейная скорость, $\text{м}/\text{с}$;

x – массовое паросодержание.

Греческие буквы

ξ – безразмерное расстояние от центра канала;

ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

τ – касательное напряжение на стенке канала, Па;

φ – истинное объемное паросодержание;

$\Delta h_{\text{ман}}$ – разность показаний дифманометра между камерами τ -метра, м;

$\Delta h_{\text{ман}}^{\Delta P}$ – разность показаний дифманометра, измеряющего полное гидравлическое сопротивление на длине H рабочего участка, м.

Над- и подстрочные индексы

' – относится к воде при температуре насыщения;

" – относится к пару при температуре насыщения;

– – знак усреднения;

Ar – относится к плотности аргона в дифманометре;

t – относится к плотности воды при температуре $t^{\circ}\text{C}$;

изо – относится к изокINETическому зонду;

ман – относится к плотности рабочей жидкости (воды) в дифманометре и его импульсных линиях;

ск – относится к выступу на наружной поверхности подвижного элемента;

γ – полученный γ -просвечиванием;

τ – полученный на основе измерения касательных напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллов П.Л., Левченко Ю.Д., Штейн Ю.Ю., Шумский Р.В. Локальные гидродинамические характеристики двухфазных потоков в трубах при высоких давлениях/ Препринт ФЭИ-3064, Обнинск, 2005.
2. A Research Program in Two-Phase Flows. CISE, Milano, January, 1963.
3. Cravarolo L., Giorgini A., Hassid F., Pedrocchi E. A Device for the Measurement of Shear Stress on the Wall of a Conduit – Its Application in the Mean Density Determination in Two-Phase Flow – Shear Stress Data in Two-Phase Adiabatic Vertical Flow. Report-R82, CISE, Milano, 1964.
4. Яблоник Р.М., Хаимов В.Л. О применении электроконтактного метода для измерения толщин пленок жидкости//Известия вузов. Энергетика. – 1971. – № 5. – С. 117-122.
5. Чен Ше-Фу, Ибеле. Потери напора и толщины жидкой пленки при кольцевом двухфазном чисто пленочном течении и течении с образованием эмульсии//Теплопередача. – 1964. – № 1. – С. 116-125.
6. Диденко А.Я. и др. Исследование сопротивления и пристенной области газожидкостного потока при дисперсно-кольцевом режиме течения/В сб.: Вопросы теплофизики ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1971. – Вып. 3. – С. 23-31.
7. Хьюитт Д., Холл-Тэйлор Н. Кольцевые двухфазные течения. – М.: Энергия, 1974.
8. Карастелев Б.Я. и др. Сопоставление методов замера толщины пленки жидкости//ПМТФ. – 1974. – № 4. – С. 161-164.

Поступила в редакцию 30.06.2006