

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

УДК 532.546.536.08

**Метод измерения истинного  
объемного паросодержания в канале  
с пористым наполнителем<sup>\*</sup>**

**Э.А. Таиров**

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск*

E-mail: tairov@isem.irk.ru

Описан новый способ измерения среднего истинного объемного паросодержания однокомпонентного двухфазного потока, движущегося в канале с неподвижным пористым наполнителем. Используется известный метод отсечки потока, но в отличие от его обычного применения паровая фаза в отсеченном объеме переводится в конденсированное состояние, а высвобождаемое пространство заполняется измеряемым количеством добавочной жидкости. Представлен результат верификации предложенной ранее формулы расчета истинного объемного паросодержания адиабатного пароводяного потока в канале с неподвижным слоем шаровых частиц с помощью данного метода.

**Ключевые слова:** пароводяной поток, зернистый слой, измерение паросодержания.

К настоящему времени существует достаточно большое количество методов измерения паро- и газосодержания в потоках, основанных на использовании различных физических принципов. В монографии [1] в качестве основных методов приводятся методы отсечек, динамических весов, гамма- и бета-просвечивания, электропроводимости, оптический метод, фотографический метод, метод термопар и термоанемометрический метод. Для их реализации требуется специальная, порой достаточно сложная аппаратура по измерению локального, среднего по сечению или лучу, а также среднего по выделенному объему паросодержания. По результатам экспериментальных исследований получены обобщающие формулы для расчета истинного объемного паросодержания при течении в трубах, кольцевых каналах и стержневых сборках [2].

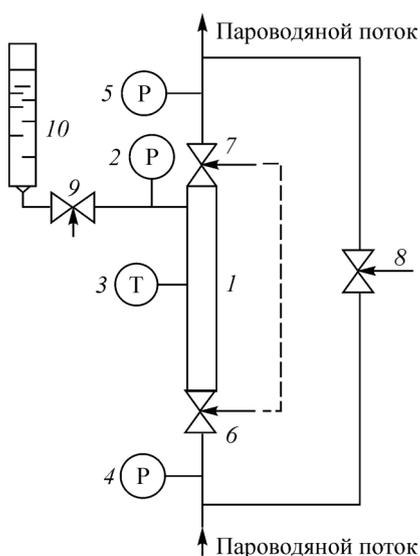
Течение двухфазного потока через пористые среды остается недостаточно изученным. В работе [3] приводились примеры попыток применения проникающего излучения различной природы с целью определения доли жидкости в смеси и было отмечено, что они требуют больших средств и усиленных процедур безопасности. Относительно простой метод взвешивания использовался в опытах [4] с пропусканием воздуха через насыщенный неподвижной водой слой шаровых частиц. Авторами исследования [3] была применена защищенная патентом техника ёмкостного зонда для измерения среднего

---

<sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках научного проекта Ш.17.1.3 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. No. АААА-А17-117030310443-5 в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН на ЦКП «Высокотемпературный контур».

объемного паросодержания в воздушно-водяном потоке через слой стеклянных шариков при атмосферном давлении. Для проверки метода использовался упомянутый метод взвешивания [4].

Взвешивание служит одним из способов нахождения объемного соотношения жидкой и газовой фаз в заранее выделенном контрольном объеме. К давно известным и хорошо себя зарекомендовавшим способам выделения контрольного объема в газожидкостных потоках относится метод отсечки потока. Рядом авторов [5, 6] было отмечено, что метод отсечки потока позволяет получать очень точные и воспроизводимые результаты. Основным требованием, предъявляемым к реализации этого метода, можно считать синхронное перекрытие потока в сечениях на границах выделяемого контрольного объема. Важным условием применимости метода отсечки является равенство фазовых составов в исследуемом потоке и отсеченном объеме при проведении измерения, поэтому он успешно используется в исследованиях воздушно-водяных и других газожидкостных потоков, где отсутствуют межфазные переходы. В традиционном виде данный метод неприменим к однокомпонентным парожидкостным потокам, для которых любое изменение давления и температуры смеси в процессе измерения после отсечки потока вызывает изменение исходного соотношения жидкой и парообразной фаз. В предлагаемом способе этот недостаток исключается тем, что определение искомого паросодержания основывается на действии закона сохранения массы пароводяной смеси в отсекаемом объеме до и после перекрытия потока. Схема измерения представлена на рис. 1. После достижения установившегося режима течения пароводяного потока на отсекаемом участке трубопровода 1 с помощью датчиков 2 и 3 измеряются давление и температура потока на этом участке. Датчики 4 и 5 используются для дополнительного контроля давления до и после перекрываемого участка. Затем отсекаемый участок перекрывается синхронизированными быстродействующими клапанами 6 и 7. Пароводяной поток при этом отклоняется от основной линии и направляется через открываемый клапан 8 по байпасной линии. Следующим шагом является внешнее охлаждение отсекаемого объема до полной конденсации в нем паровой фазы. Принудительное охлаждение отсекаемого объема осуществляется направленным воздушным или воздушно-капельным потоком. Процесс конденсации пара сопровождается падением давления и созданием разрежения в отсекаемом объеме 1. После падения давления ниже атмосферного открывается вентиль 9, установленный на линии соединения отсекаемого объема с заполненным водой мерным сосудом 10. Вода под действием атмосферного давления из мерного сосуда 10 поступает



в исследуемый объем 1 до полной конденсации содержащегося в этом объеме пара. По известным свободному объему отсекаемого участка 1 и измеренному объему добавочной воды можно определить среднее истинное объемное паросодержание в отсекаемом потоке. Для этого используются следующие уравнения баланса масс. Масса пароводяной смеси  $M$  в отсекаемой части потока записывается как

$$M = V_0 [\varphi \rho_1'' + (1 - \varphi) \rho_1'], \quad (1)$$

где  $V_0$  — объем пористого пространства в отсекаемом участке,  $\rho_1''$ ,  $\rho_1'$  — плотности пара и воды на линии насыщения при среднем давлении  $P_1$

Рис. 1. Схема измерительного участка.

в потоке,  $\varphi$  — истинное объемное паросодержание в потоке при давлении  $P_1$ . После конденсации пара и охлаждения жидкости до температуры  $t_2$ , меньшей чем температура насыщения, для этой же массы будет справедливо следующее равенство:

$$M = (V_0 - V_{\text{ad}}) \rho_2, \quad (2)$$

где  $V_{\text{ad}}$  — объем добавочной воды,  $\rho_2$  — плотность воды при конечной температуре смешения  $t_2$ .

Приравнявая (1) и (2), получаем формулу для определения среднего истинного объемного паросодержания в потоке под рабочим давлением  $P_1$ :

$$\varphi = \frac{1}{\rho'_1 - \rho''_2} \left[ \rho'_1 - \left( 1 - \frac{V_{\text{ad}}}{V_0} \right) \rho_2 \right]. \quad (3)$$

Использование в уравнении (3) параметров  $\rho''_1$  и  $\rho'_1$ , найденных по среднему давлению, повышает точность определения  $\varphi$  при небольших относительных перепадах давления  $\Delta P/P_1$  по высоте засыпки. Величина  $V_{\text{ad}}$ , измеренная по шкале мерного сосуда, пересчитывается на температуру  $t_2$ . Способ реализован на физической установке «Высокотемпературный контур» для измерения истинного объемного паросодержания при движении пароводяного потока в канале, заполненном неупорядоченной упаковкой шаровых частиц диаметром 2 мм из нержавеющей стали. Отсекаемый участок имеет длину 215 мм и внутренний диаметр 39 мм. Результаты измерений использованы для верификации расчетной формулы для  $\varphi$

$$\varphi = \left[ 1 + s \frac{\rho''_1}{\rho'_1} \frac{1-x}{x} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где коэффициент межфазного скольжения  $s$  определен по зависимости [7]

$$s = 1 + a_s(P) \exp \left( -\frac{b_s(P)}{x} - c_s(P)x \right), \quad (5)$$

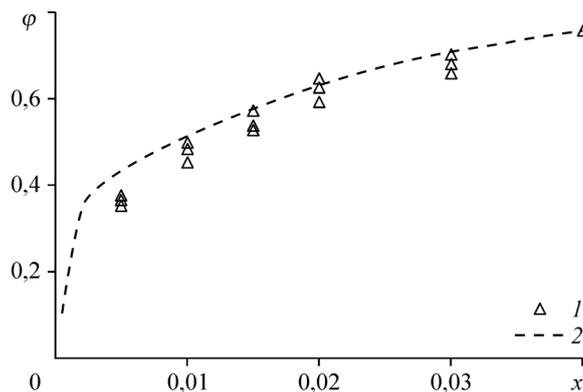


Рис. 2. Зависимость истинного объемного паросодержания  $\varphi$  от расходного массового паросодержания  $x$ .

В слое частиц диаметром 2 мм при давлении 0,6 МПа, массовой скорости  $\rho w = 200 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{с})$ ,  
1 — эксперимент, 2 — расчет по формулам (4) и (5).

$$a_s(P) = 7,33 - 8,27 P + 4,35 P^2,$$

$$b_s(P) = 0,0592 - 0,124 P + 0,0746 P^2,$$

$$c_s(P) = 2,71 - 1,90 P + 1,39 P^2.$$

Формула (5) получена путем обработки экспериментальных данных по критическому истечению в неподвижном слое шаровых частиц с применением математической модели двухфазного потока. Как и в работе [2], для каналов малого диаметра влияние массовой скорости на  $s$  не выявлено. На рис. 2 приведены результаты расчета по формулам (4) и (5) и данные измерений с помощью описанного нового метода. Предлагаемый способ измерения может быть использован как для получения новых экспериментальных данных объемного паросодержания в каналах с зернистой или другого типа насадкой, так и для верификации используемых расчетных зависимостей. Предпочтительными объектами для применения представленного метода являются крупнозернистые засыпки с минимальным числом микропор, затрудняющих проникновение в них добавочной жидкости из мерного сосуда. Новизна метода подтверждена патентом на изобретение [8].

### Список литературы

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 2. М.: Наука, 1987. 360 с.
2. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ: справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике / Под ред. Кириллова П.Л. Т. 1. М.: Изд. «АТ», 2010. 771 с.
3. Chikhi N., Clavier R., Laurent J.P., Fichot F., Quintard M. Pressure drop and average void fraction measurements for two-phase flow through highly permeable porous media // Ann. Nucl. Energy. 2016. Vol. 94. P. 422–432.
4. Tutu N., Ginsberg T., Chen J. Interfacial drag for two-phase flow through high permeability porous beds // J. Heat Transf. 1984. Vol. 106, No. 4. P. 865–870.
5. Хьюитт Дж., Холл-Тэйлор Н. Кольцевые двухфазные течения. Пер. с англ. М.: Энергия, 1974. 408 с.
6. Сахаров В.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в вертикальных трубах и промышленных подъемниках. М.: Изд-во Нефть и газ, 2004. 398 с.
7. Pokusaev V.G., Tairov E.A., Khan P.V., Khrantsov D.P. Numerical and analytical approach for modeling critical two-phase flow with granular layer // J. Engng Thermophysics. 2018. Vol. 27, No. 1. P. 20–29.
8. Пат. 2685016 РФ, МПК<sup>51</sup> G01N 7/14, СПК<sup>52</sup> G01N 7/14, G01N 7/16. Способ определения истинного объемного паросодержания / Таиров Э.А., Маслов А.И., Сафаров А.С., Гаманец В.Г.; заявитель и патентообладатель ИСЭМ СО РАН. № 2018108941; заявл. 12.03.2018; опубл. 16.04.2019, Бюл. № 11.

*Статья поступила в редакцию 2 июля 2019 г.,  
после доработки — 15 сентября 2019 г.,  
принята к публикации 6 ноября 2019 г.*