

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СТЕНДАХ

### АННОТАЦИЯ

В докладе представлена методика определения расхода двухфазной смеси. Приведены некоторые результаты определения расхода двухфазной смеси в аварийных режимах.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании аварийных режимов в стендовых условиях одной из центральных проблем является определение расхода двухфазной смеси в различных элементах контура. Как правило, определение расхода двухфазной смеси необходимо проводить в существенно нестационарных условиях, когда характерное время исследуемого процесса не более 0,2 с. Известные методики (диафрагмы, сопла, трубки ВТИ и т.д.) для определения расхода однофазных потоков основаны на зависимости одной из измеряемых величин от расхода. Показано [1], что такие методики не дают приемлемых результатов при определении расходов двухфазных смесей.

### 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ

Известны методики, в которых расход смеси определяется на основе измерения двух величин – средней по сечению плотности смеси  $\bar{\rho}_{см}$  и средней по сечению скорости  $\bar{w}_{см}$ :

$$G_{см} = \bar{\rho}_{см} \bar{w}_{см} F, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения канала.

#### 2.1. Определение расхода двухфазной смеси с помощью $\gamma$ -просвечивания и драг-пластины

Среднюю плотность двухфазной смеси возможно определить с помощью различных методик. К наиболее часто используемым относятся бесконтактные методы. Среди бесконтактных методов измерения  $\rho_{см}$  наиболее распространен метод  $\gamma$ -просвечивания [2,3]. Сущность метода  $\gamma$ -просвечивания состоит в определении параметров смеси по ослаблению интенсивности  $\gamma$ -лучей, пронизывающих поток. Метод  $\gamma$ -просветки позволяет проводить измерение  $\rho_{см}$  в стационарных и динамических режимах. Метод обеспечивает возможность непрерывной регистрации  $\rho_{см}(t)$  с усреднением за время значительно меньшее, чем характерное время переходного процесса [4].

Среднюю скорость потока  $\bar{w}_{см}$  можно определить с помощью измерения среднего по сечению

динамического напора  $\overline{\rho_{см} w_{см}^2}$ . Так, например, в работах [3,5] усредненный по сечению трубы динамический напор  $\overline{\rho_{см} w_{см}^2}$  определяется с помощью измерения силы, с которой поток действует на перфорированную пластину (драг-пластину). Механическое воздействие потока вызывает перемещение драг-пластины, которое трансформируется в электрический сигнал с амплитудой, пропорциональной этому воздействию. Для двухфазного потока выражение для силы, действующей на драг-пластину в приближении двухскоростной модели движущегося потока, имеет следующий вид

$$F = G_{см}^2 \frac{\rho_n S^2 + \rho_g (1-\varphi)}{[\rho_n S + \rho_g (1-\varphi)]^2} \frac{C}{2F}, \quad (2)$$

где  $S$  – коэффициент скольжения фаз;  $\varphi$  – объемное паросодержание;  $C$  – коэффициент, определяемый в результате калибровки на однофазном потоке;  $\rho_n$  – плотность пара;  $\rho_g$  – плотность воды.

Как видно из (2), существует зависимость силы, действующей на драг-пластину, от коэффициента скольжения фаз. Эта зависимость в общем случае неизвестна. Показано [3], что наиболее точно измерение динамического напора и соответственно расхода смеси  $G_{см}$  возможно в областях пузырькового и дисперсного режимов. В режимах, где скольжение велико (кольцевой и дисперсно-кольцевой), ошибка измерения велика.

Метод измерения  $G_{см}$  с помощью  $\gamma$ -денситометра и драг-пластины реализован в измерительных вставках, предоставленных ФГУП «ЭНИЦ» Национальной лабораторией США INEEL. Основные недостатки системы следующие:

- 1) высокая стоимость измерительной системы и ее эксплуатации;
- 2)  $\gamma$ -детектор охлаждается азотом, что требует постоянного обслуживания (заправка азотом раз в 3–5 часов из-за постоянного испарения);
- 3) вторичная аппаратура  $\gamma$ -детектора требует коррекции пределов измерения;
- 4) датчики силы имеют узкий диапазон, что требует замены датчиков в течение эксперимента;
- 5) большая масса измерительной вставки, что приводит к дополнительным тепловым потерям в контуре.

#### 2.2. Методика определение расхода двухфазной смеси

В ФГУП «ЭНИЦ» разработана и опробована на установке ПСБ-ВВЭР методика определения  $G_{см}$  на

основе связи  $G_{см}$  с двумя измеряемыми величинами  $\overline{\rho_{см}}$ ,  $\overline{w_{см}^2}$ . Плотность смеси предложено определять с помощью гидростатического метода,  $\overline{w_{см}^2}$  на основе измерения перепада давления на интегрирующей напорной трубке.

Гидростатический метод [6] заключается в измерении статических давлений в двух точках канала, измерении разности этих давлений и определении  $\overline{\rho_{см}}$  из равенства

$$\overline{\rho_{см}} = \frac{(\Delta P_{ст} - \Delta P_{тр})}{gH}, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – диаметр трубопровода;  $\Delta P_{ст}$  – гидростатический перепад давления между точками отбора;  $\Delta P_{тр}$  – гидравлическое сопротивление между точками отбора.

Метод реализуется при измерении  $\overline{\rho_{см}}$  на горизонтально ориентированных участках контура (рис. 1). В этом случае  $\Delta P_{см} = 0$ , тогда

$$\overline{\rho_{см}} = \frac{\Delta P_{ст}}{gH}. \quad (4)$$

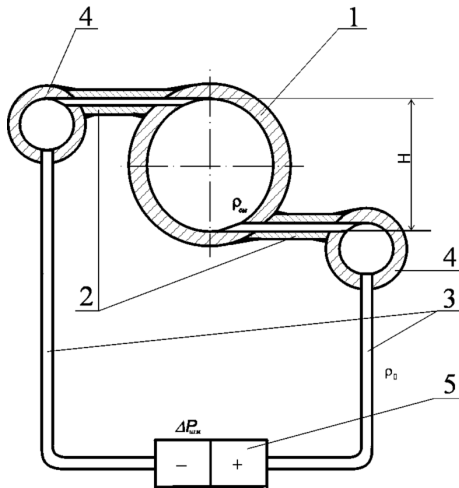


Рис. 1. Гидростатический датчик плотности двухфазной смеси: 1 – трубопровод; 2 – отборы давления; 3 – импульсные линии; 4 – уравнительные сосуды; 5 – датчик перепада давления

Гидростатический метод позволяет определять плотность смеси на горизонтальных участках контура при любых режимах течения.

На рис. 2 показан пример определения  $\overline{\rho_{см}}$  гидростатическим методом в одном из аварийных режимов, реализованном на установке ПСБ-ВВЭР-1000. Критерием правильности определения является удовлетворительное совпадение  $\overline{\rho_{см}}$  и  $\rho_v$  при однофазном течении. Как видно из рис. 2, в области однофазного потока совпадение измеренной  $\overline{\rho_{см}}$  и плотности воды, определенной по температуре и давлению (при расчете плотности использовались таблицы свойств воды и пара), удовлетворительное.

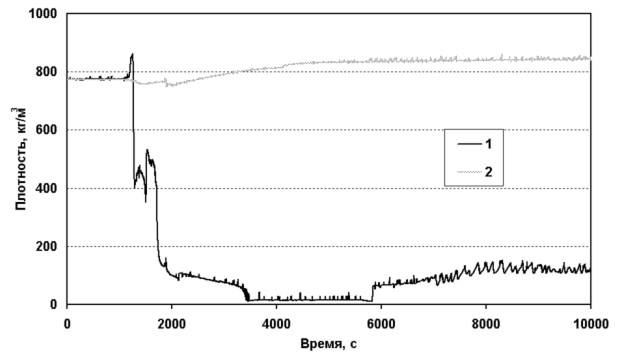


Рис. 2. Зависимость плотности двухфазного потока от времени: 1 – измеренная плотность; 2 – плотность воды, определенная по температуре и давлению

Среднюю скорость  $\overline{w_{см}}$  предлагается определять на основе измерения перепада давления в напорных камерах интегрирующей трубки [7]. Интегрирующая трубка (рис. 3) представляет собой заглушенную с одной стороны трубку 10x1, разделенную продольной перегородкой на две камеры, из которых осуществлялся отбор давления на датчик перепада давления. В лобовой и кормовой частях трубки по образующей просверлены пять отверстий. Трубка устанавливается в трубопровод вертикально, перекрывая весь диаметр. Разность давлений между камерами пропорциональна динамическому напору потока:

$$\Delta P_{Д} = \frac{1}{\alpha^2} \left( \frac{\rho w^2}{2} \right)_{см}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, определяемый при калибровке.

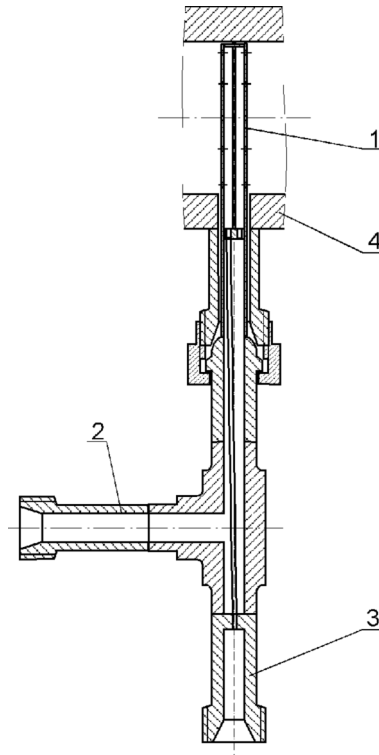


Рис. 3. Интегрирующая напорная трубка: 1 – перфорированная трубка; 2 – штуцер отбора давления из лобовой камеры; 3 – штуцер отбора давления из кормовой камеры; 4 – измерительный канал

Использование интегрирующей трубки позволяет избежать влияния неравномерности профиля скорости потока по диаметру, так как в камерах создается давление, соответствующее среднему динамическому напору потока. Таким образом, с помощью интегрирующей напорной трубки можно определять средний по сечению динамический напор потока в вертикальных каналах для гомогенных и в горизонтальных каналах для гомогенных и стратифицированных режимов течения.

По измеренному перепаду давления  $\Delta P_D$  определяется средний по сечению динамический напор потока:

$$\left( \frac{\rho w^2}{2} \right)_{cm} = \alpha^2 \Delta P_D \quad (6)$$

или

$$G_{cm} = \alpha F \sqrt{2 \Delta P_D \rho_{cm}} \quad (7)$$

Для определения  $\alpha$  трубка была пролита на калибровочном стенде. В результате проливки холодной водой при атмосферном давлении (диапазон изменения скорости от 0,03 до 1,3 м/с) была получена зависимость  $\alpha(Re)$ , рис. 4. Как видно из рисунка, при  $Re \geq 15000$   $\alpha$  автомодельно относительно  $Re$  (скорость потока 0,09 м/с) и  $\alpha = 0,69$ .

Для определения области автомодельности в случае двухфазного потока число Рейнольдса определялось следующим образом:

$$Re_{cm} = \frac{\rho_{cm} w_{cm} H}{\eta_{cm}} \quad (8)$$

где  $w_{cm}$  – скорость смеси;  $\eta_{cm}$  – динамическая вязкость смеси.

В настоящее время нет надежных формул для определения  $\eta_{cm}$ . Следуя [8], примем, что динамическая вязкость смеси равна динамической вязкости жидкости ( $\eta_{cm} = \eta_0$ ). В пользу такого допущения говорит то, что на стенке, где градиент скорости максимальный, в пузырьковом, снарядном и дис-

персном режимах всегда сохраняется жидкость [8]. Так как

$$\rho_{cm} w_{cm} = \rho' w_0 \quad (9)$$

где  $\rho'$  – плотность воды на линии насыщения;  $w_0$  – приведенная скорость смеси, то

$$Re_{cm} = \frac{\rho' w_0 H}{\eta'} \quad (10)$$

где  $\eta'$  – динамическая вязкость воды на линии насыщения.

На рис. 5 приведен пример определения среднего по сечению динамического напора смеси в одном из аварийных режимов на установке ПСБ-ВВЭР-1000 (соответствующее изменение плотности смеси для этого режима представлено на рис. 2).

Таким образом, при указанных выше допущениях  $G_{cm}$  может быть определена по следующей зависимости:

$$G_{cm} = \alpha F \sqrt{2 \Delta P_D \frac{\Delta P_{ст}}{gH}} \quad (11)$$

Пример определения расхода двухфазной смеси на основе предложенной методики представлен на рис. 6.

Методика определения расхода двухфазной смеси  $G_{cm}$  с помощью гидростатического денситометра и интегрирующей напорной трубки позволяет проводить измерения во всей области существования двухфазного потока. Наиболее надежные и точные результаты могут быть получены в гомогенных (пузырьковый и дисперсный) и стратифицированных режимах течения двухфазного потока. Методика является достаточно простой, надежной и недорогой, поскольку в качестве чувствительных элементов используются стандартные датчики перепада давления. Методика применяется на горизонтальных участках трубопровода и не требует участка стабилизации после вертикальных изгибов трубопровода, так как интегрирующая трубка устраняет воздействие вертикальной неравномерности поля скорости.

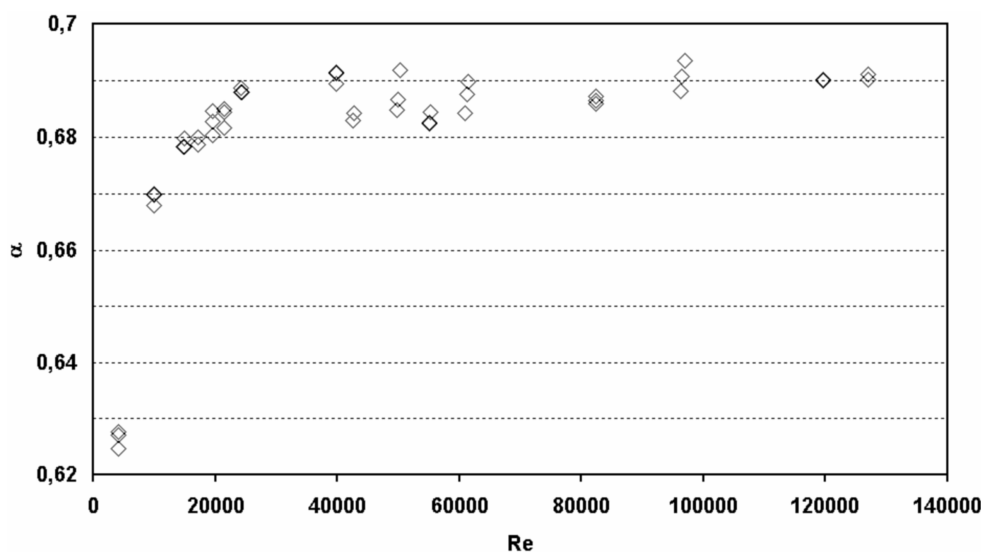


Рис. 4. Зависимость  $\alpha$  от  $Re$

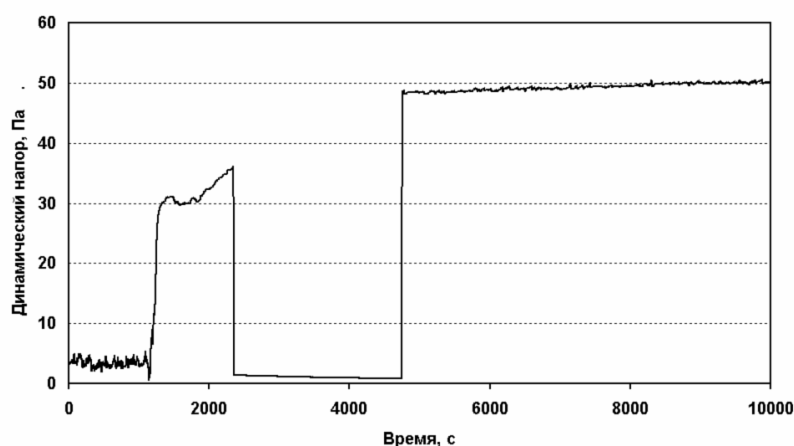


Рис. 5. Зависимость динамического напора двухфазного потока от времени

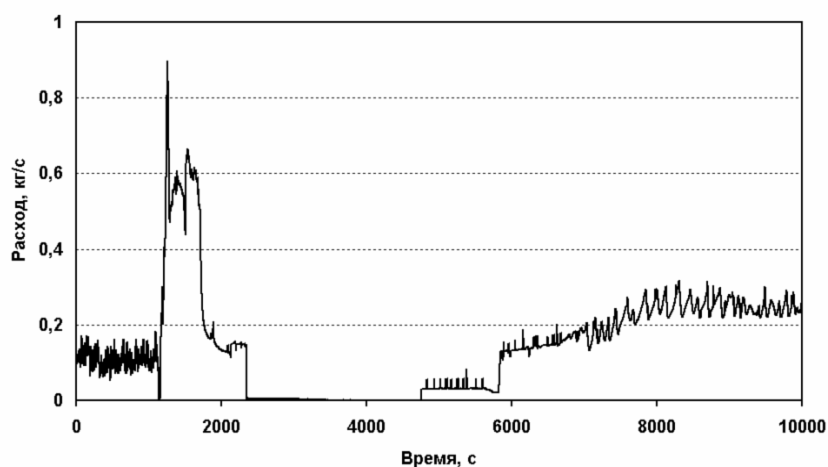


Рис. 6. Зависимость расхода двухфазного потока от времени

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$G_{см}$  – расход смеси, кг/с;  
 $F$  – площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>;  
 $\rho_{см}$  – средняя по сечению плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  
 $w_{см}$  – средняя по сечению скорость смеси, м/с;  
 $\rho_{см} w_{см}^2$  – средний по сечению динамический напор смеси, Па;  
 $S$  – коэффициент скольжения фаз;  
 $\phi$  – объемное паросодержание;  
 $C$  – коэффициент, определяемый в результате калибровки на однофазном потоке;  
 $\rho_n$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_v$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $H$  – диаметр трубопровода, м;  
 $\Delta P_{ст}$  – гидростатический перепад давления между точками отбора, Па;  
 $\Delta P_{тр}$  – гидравлическое сопротивление между точками отбора, Па;  
 $\alpha$  – коэффициент, определяемый при калибровке;  
 $Re$  – число Рейнольдса;  
 $w_0$  – приведенная скорость, м/с;  
 $\rho'_v$  – плотность воды на линии насыщения, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\eta_{см}$  – динамическая вязкость смеси, кг/(м·с);  
 $\eta'_v$  – динамическая вязкость воды на линии насыщения, кг/(м·с).  
 Индексы:  
 в – вода;

п – пар;  
 см – пароводяная смесь;  
 ст – статический;  
 тр – трение;  
 ' – свойства на линии насыщения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Болтенко Э.А., Цой В.Р., Швец В.Г. Измерение расхода двухфазной смеси при проведении исследований аварийных процессов на интегральных крупномасштабных стендах // Теплоэнергетика. 2005. №3. С. 10.
2. Стырикович М.А., Резников М.И. Методы экспериментального исследования процессов генерации пара. М.: Энергия, 1977.
3. Anderson J.L., Fincke J.R. Mass Flow Measurements in Air / Water Mixtures Using Drag Devices and Gamma Densitometer // ISA Transactions. 1980. Vol. 19. № 1. P. 37–48.
4. Алхутов Н.С., Болтенко Э.А., Цой В.Р. Измерение плотности двухфазной смеси в стационарных и переходных режимах // Теплоэнергетика. 2002. № 9. С. 67.
5. Anderson J.L. Drag Devices For Two-Phase Mass Flow Measurements // D.C.20555, Idaho, 1980.
6. Патент России МКИ 601 №9/26 №2187090 11.02.2000. Способ определения средней плотности двухфазной смеси. Заявка № 2000103189/28 от 11.02.2000 / Э.А. Болтенко, А.А. Савинов, А.Г. Толмачев и др. // Б.И. 2002. № 22.
7. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества: Справочник. –5-е изд., перераб. и доп. СПб.: Издательство “Политехника”, 2002.
8. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. М.: Издательство МЭИ, 2000.