

УДК 621.039.562:621.039.524.44

## Использование нейтронного датчика для определения паросодержания

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ЮРОВА Л. Н., СМОЛИН В. Н., ЕМЕЛЬЯНЕНКО В. Д., ЕСИКОВ В. И., СМИРНОВ В. Е., ШИШОВ В. П.

Широкое развитие ядерной энергетики в СССР и, в частности, строительство АЭС с реакторами типа РБМК обусловили интерес к устройствам для определения паросодержания пароводяной смеси как на выходе из парогенерирующего канала, так и по длине его модели, исследуемой на теплофизическом стенде. Решению этих задач с использованием бесконтактного нейтронного датчика паросодержания и посвящена настоящая работа.

Результаты исследования [1, 2] макетов датчиков, реализующих метод замедленных нейтронов, показали возможность и целесообразность его использования для определения паросодержания, позволили перейти к конструированию и изготовлению датчика, пригодного для использования на канале с реальной пароводяной смесью, а также к практическому его применению для определения плотности и объемного паросодержания среды.

Принципиально устройство такого датчика не отличается от рассмотренного в работе [1]. На рис. 1 изображены градуировочные зависимости  $n(\rho)$  датчика, установленного на канале диаметром  $70 \times 4$  мм (1) и на макете парогенерирующего канала [3] теплофизического стенда (2). Эти зависимости соответствуют двум задачам, которые могут быть решены с помощью нейтронного датчика: контролю паросодержания на выходе из канала и изучению распределения паросодержания по его длине. Для градуировки датчика использованы имитирующие пароводяную среду вещества.

Градуировочная среда отличается от реальной пароводяной смеси не только химическим составом, но и температурой. Максимальное влияние отмеченных различий на градуировочную зависимость оценивалось сравнением с ней зависимости скорости счета нейтронов от плотности воды при разогреве стенда. Наибольшее различие получено при сравнении градуировок для канала диаметром  $70 \times 4$  мм. После внесения поправки на паспортную температурную нестабильность счетчиков максимальное расхождение градуировочных зависимостей, построенных по воде и парафину, составляет 1,5% по плотности.

Относительные аппаратная ( $\Delta/\rho$ ) и статистическая ( $\sigma/\rho$ ) составляющие погрешности определения [1] в канале диаметром  $70 \times 4$  мм (1) и в парогенерирующем канале теплофизического стенда (2) изображены на рис. 2, откуда видно преимущество нейтронного метода определения плотности пароводяной смеси перед методом просвечивания  $\gamma$ -квантами. При одинаковой скорости счета статистические составляющие погрешности определения плотности этими методами находятся в том же отношении, что и аппаратные.

Нейтронный датчик можно использовать для определения массового паросодержания  $X_p$ , но только при однозначном соответствии  $\rho$  и  $X_p$ , т. е. при заданных значениях массового расхода  $G$ , давления смеси на линии насыщения  $P_s$  и заданной конструкции участка, на котором

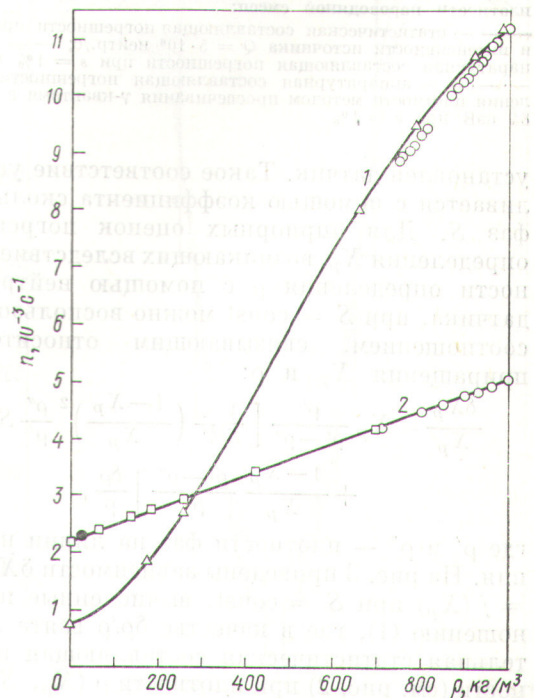


Рис. 1. Градуировочные зависимости датчика:  $\Delta$  — парафино-воздушная смесь;  $\square$  — смесь оргстекло — воздух;  $\circ$  — вода при температуре от 20 до 250 °C;  $\bullet$  — водяной пар при  $P = 42$  кгс/см<sup>2</sup> и  $t = 253$  °C

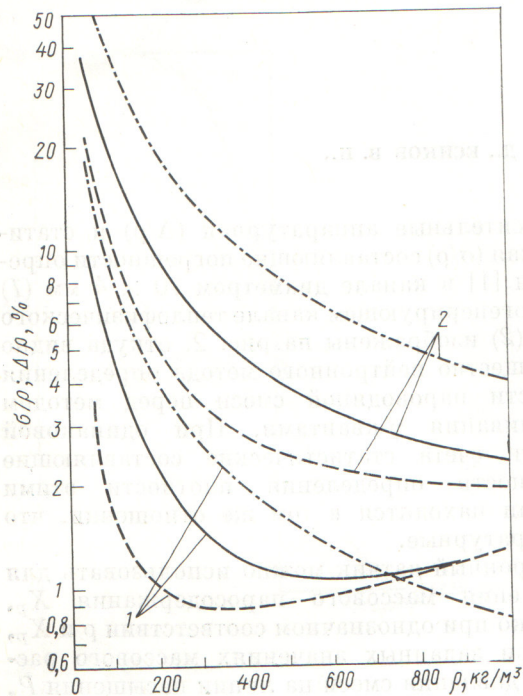


Рис. 2. Относительные погрешности определения датчиком плотности пароводяной смеси:  
 — статистическая составляющая погрешности при  $\tau = 1$  с и интенсивности источника  $Q = 5 \cdot 10^6$  нейтр./с; — аппаратная составляющая погрешности при  $s = 1\%$  (см. [1]); — аппаратная составляющая погрешности определения плотности методом просвечивания  $\gamma$ -квантами с энергией 84 кэВ при  $s = 1\%$

установлен датчик. Такое соответствие устанавливается с помощью коэффициента скольжения фаз  $S$ . Для априорных оценок погрешности определения  $X_p$ , возникающих вследствие неточности определения  $\rho$  с помощью нейтронного датчика, при  $S = \text{const}$  можно воспользоваться соотношением, связывающим относительные приращения  $X_p$  и  $\rho$ :

$$\frac{\delta X_p}{X_p} = X_p \frac{\rho'}{\rho' - \rho''} \left[ \frac{1}{S} + \left( \frac{1 - X_p}{X_p} \right)^2 \frac{\rho''}{\rho'} S + \frac{1 - X_p}{X_p} \frac{\rho' - \rho''}{\rho'} \right] \frac{\delta \rho}{\rho}, \quad (1)$$

где  $\rho'$  и  $\rho''$  — плотности фаз на линии насыщения. На рис. 3 приведены зависимости  $\delta X_p / X_p = f(X_p)$  при  $S = \text{const}$ , вычисленные по соотношению (1), где в качестве  $\delta\rho/\rho$  взята относительная статистическая составляющая погрешности (см. рис. 2) при плотности  $\rho(X_p, S)$ , соответствующей установившемуся подъёмному движению пароводяной смеси в вертикальном канале диаметром  $70 \times 4$  мм. Эти зависимости свидетельствуют о целесообразности создания

в измерительном участке при  $X_p \geq 0,2$  условий, способствующих увеличению  $S$ . В реальных условиях  $S$  меняется от 1,5 до 3,2 при  $0,1 \leq X_p \leq 0,5$ .

Градуировочные зависимости датчика для определения  $X_p$  могут быть построены на теплофизическом стенде, в пароводяной тракте которого включен измерительный участок с датчиком, в виде семейства зависимостей  $n = f(X_p)$  при  $G = \text{const}$  и  $P_s = \text{const}$ .

В пароводяной смеси, выходящей из реактора, содержится  $^{17}\text{N}$ , являющийся источником нейтронов. Возникающий при этом нейтронный фон необходимо учесть при градуировке или использовать достаточно мощный источник нейтронов с тем, чтобы фоном можно было пренебречь.

При использовании нейтронного датчика для изучения распределения паросодержания вдоль канала необходим анализ влияния изменения плотности среды по длине чувствительного объема датчика на скорость счета замедленных нейтронов. Методика такого анализа и способ внесения поправок, учитывающих интегральный характер регистрируемого с помощью датчика эффекта, предложены в работе [1].

Проверка подтвердила применимость к используемому датчику математической модели [1]. В этой модели датчик описывается градуировочной зависимостью (см. рис. 1) и функцией чувствительности  $\tilde{\eta}(l)$ , которая характеризует вклад элемента исследуемой среды  $dl$ , находящегося на расстоянии  $l$  от его центра, в общую

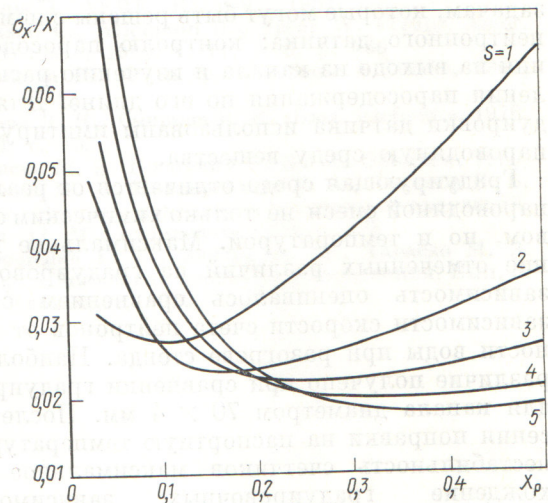


Рис. 3. Относительная погрешность определения  $X_p$  нейтронным датчиком при температуре пароводяной смеси  $295^\circ\text{C}$  и различных значениях  $S$

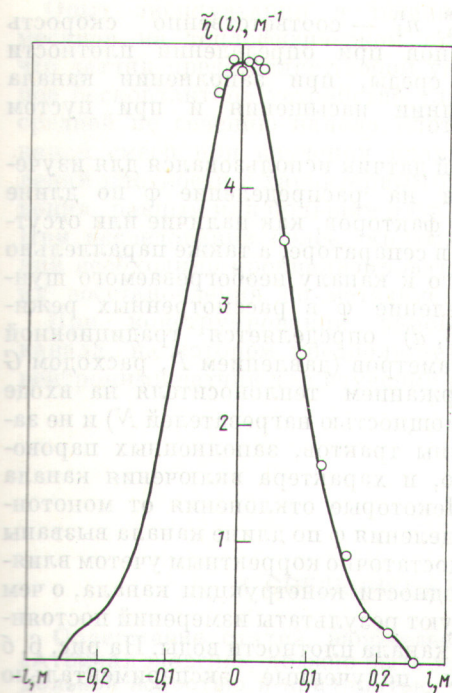


Рис. 4. Функция чувствительности датчика:  
 ○ — эксперимент; — — — аппроксимирующая зависимость:  $\eta(l) = 4,900 - 18,406 (l/a)^2 + 25,539 (l/a)^4 - 12,714 \times (l/a)^6 + 0,685 (l/a)^8$ , где  $a = 0,235$  м — половина длины датчика

скорость счета нейтронов. Измеренная функция чувствительности датчика изображена на рис. 4.

Математическая модель датчика использовалась для анализа результата изучения с его помощью распределения плотности в виде ступенчатой «ямы». На рис. 5 изображены фактическое и восстановленное по методике работы [1] распределение плотности исследуемой среды. Результаты свидетельствуют о наличии расхождений между исходным разрывным и восстановленными распределениями плотности. Расхождения максимальны вблизи разрывов исходного распределения плотности. Однако следует отметить, что разрывные распределения  $\rho$  или  $\varphi$  по длине парогенерирующего канала нехарактерны для теплофизического эксперимента. Как правило, наблюдаются плавные распределения, подобные восстановленному распределению на рис. 5. Анализ по методике работы [1] показал возможность уверенного восстановления такого исходного распределения по измеренной скорости регистрации нейтронов.

Математическая модель датчика позволяет оценить влияние нестационарности исследуемого процесса на усредненное датчиком значение плотности, если задан закон изменения

плотности в пространстве и во времени —  $n(\rho, \tau)$ . В частном случае, когда нестационарный процесс можно представить как перенос через измерительный участок стационарного распределения плотности, для оценки временного разрешения датчика могут быть использованы результаты проведенных оценок его пространственной разрешающей способности. Исследования показали, что с помощью датчика можно уверенно разрешить плавное изменение плотности на длине 0,9 м. Тогда при скорости перемещения среды через датчик  $V$  (м/с) получим выражение для предельной частоты изменения распределения плотности, разрешаемой датчиком без искажений формы:  $f_{\text{макс}} = V/0,9$ .

Помимо рассмотренного имеется ограничение, связанное с необходимостью уменьшить время счета для того, чтобы сделать несколько измерений в течение определенного нестационарного процесса. Это увеличивает статистическую составляющую погрешности определения плотности. Если допустимое значение статистической

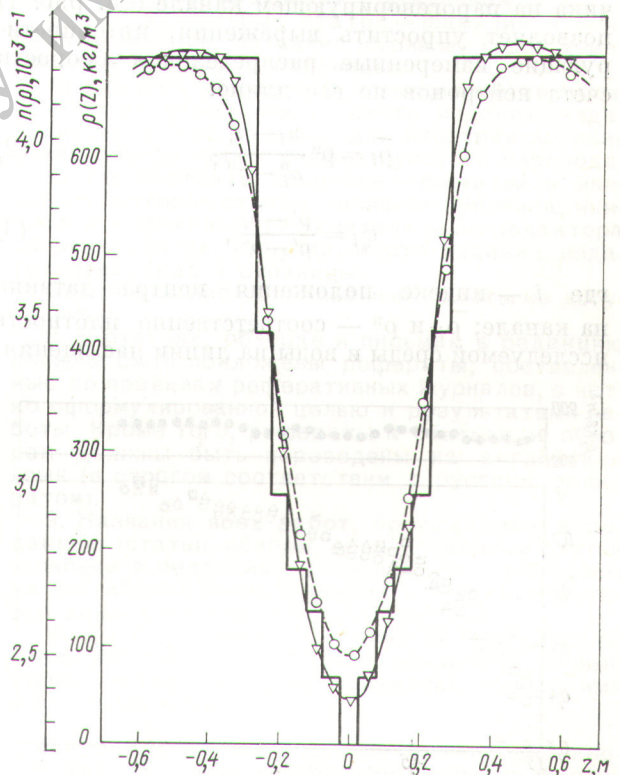


Рис. 5. Сравнение исходного (гистограмма), измеренного (○) и восстановленного (▽) распределений плотности исследуемой среды при перемещении датчика вдоль распределения плотности в виде ступенчатой «ямы» и рассчитанная по математической модели скорость счета (— — —) для исходного распределения плотности

составляющей есть  $(\sigma_p/\rho)_{\text{доп}}$ , то при  $k$ -измерениях за период предельная частота может быть вычислена по формуле

$$f_{\text{макс}} = \frac{1}{k\tau_0} \frac{Q}{Q_0} \left[ \left( \frac{\sigma_p}{\rho} \right)_{\text{доп}} / \left( \frac{\sigma_p(Q_0\tau_0)}{\rho} \right) \right]^2,$$

где  $Q$  — интенсивность источника нейтронов, нейтр./с;  $\sigma_p(Q_0\tau_0)/\rho$  — относительная статистическая составляющая погрешности определения плотности, полученная при  $Q_0 = 5 \cdot 10^6$  нейтр./с и  $\tau_0 = 1$  с (см. рис. 2).

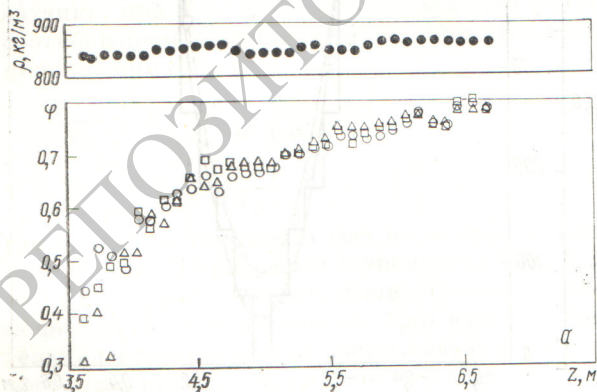
Таким образом, можно сделать заключение о практической пригодности датчика для исследования распределения паросодержания по длине канала теплофизического стенда, представляющего собой семистержневую модель канала реактора РВМК. При этом для получения корректных результатов необходимо учитывать неравномерность распределения скорости счета нейтронов по длине канала, заполненного однородной средой, которая обусловлена неоднородностью конструкции канала.

Линейность градуировочной зависимости датчика на парогенерирующем канале (см. рис. 1) позволяет упростить выражения, интерпретирующие измеренные распределения скорости счета нейтронов по его длине:

$$\bar{\rho}_i = \rho^B \frac{n_i - n_i^{\text{II}}}{n_i^{\text{B}} - n_i^{\text{II}}}, \quad (2)$$

$$\varphi_i = \frac{\rho' - \bar{\rho}_i}{\rho' - \rho^{\text{II}}}, \quad (3)$$

где  $i$  — индекс положения центра датчика на канале;  $\bar{\rho}_i$  и  $\rho^B$  — соответственно плотность исследуемой среды и воды на линии насыщения,



кг/м<sup>3</sup>;  $n_i, n_i^{\text{B}}, n_i^{\text{II}}$  — соответственно скорость счета нейтронов при определении плотности исследуемой среды, при заполнении канала водой на линии насыщения и при пустом канале, с<sup>-1</sup>.

Нейтронный датчик использовался для изучения влияния на распределение  $\varphi$  по длине канала таких факторов, как наличие или отсутствие уровня в сепараторе, а также параллельно подключенного к каналу необогреваемого шунта. Распределение  $\varphi$  в рассмотренных режимах (рис. 6, а) определяется традиционной системой параметров (давлением  $P$ , расходом  $G$  и теплосодержанием теплоносителя на входе в канал  $i_{\text{вх}}$ , мощностью нагревателей  $N$ ) и не зависит от длины трактов, заполненных пароводяной смесью, и характера включения канала в систему. Некоторые отклонения от монотонности распределения  $\varphi$  по длине канала вызваны вероятно, недостаточно корректным учетом влияния неоднородности конструкции канала, о чем свидетельствуют результаты измерений постоянной по длине канала плотности воды. На рис. 6, б представлены полученные экспериментально распределения  $\varphi$  по длине канала в кризисном режиме и близком к нему бескризисном. Форма распределения паросодержания имеет плавный, монотонный вид в обоих режимах. Никаких аномалий в районе сечения кризиса не обнаружено.

Анализ погрешностей измерений показал, что с помощью нейтронного датчика плотность пароводяной смеси в модели парогенерирующего канала измеряется с относительной погрешностью менее 4,7%, абсолютная погрешность определения  $\varphi$  не хуже 0,008. Неопределенность  $\rho$ , вызванная изменением плотности пароводяной смеси на длине датчика, не превышает 0,3%.

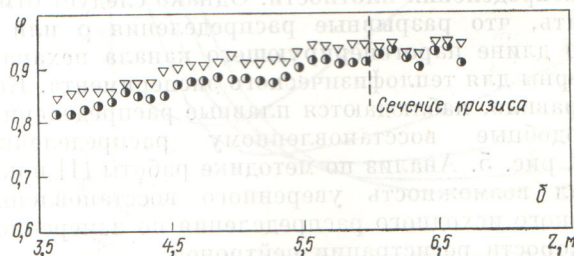


Рис. 6. Распределения  $\varphi$  по длине парогенерирующего канала при различных условиях:

● — вода при  $P = 70$  кгс/см<sup>2</sup> и  $t = 200$  °С; пароводяная смесь с уровнем (□) и без уровня (△) в сепараторе ( $P = 70$  кгс/см<sup>2</sup>;  $i_{\text{вх}} = 1037$  кДж/кг;  $G = 3200$  кг/ч;  $N = 479$  кВт) и с необогреваемым шунтом (○); ● — бескризисный режим ( $P = 70$  кгс/см<sup>2</sup>;  $G = 1496$  кг/ч;  $i_{\text{вх}} = 1135$  кДж/кг;  $N = 508$  кВт); ▽ — кризисный режим ( $P = 70,4$  кгс/см<sup>2</sup>;  $G = 1496$  кг/ч;  $i_{\text{вх}} = 1148$  кДж/кг;  $N = 558$  кВт)

Опыт эксплуатации в течение нескольких месяцев на теплофизическом стенде показал, что датчик представляет собой удобное, надежное бесконтактное устройство для определения средней по сечению канала плотности пароводяной смеси при изучении плавных распределений плотности с характерным периодом изменения, равным или большим двух длин датчика. При исследовании более «крутых» распределений необходимо проанализировать возможность их восстановления по методике работы [1].

При конструировании парогенерирующего канала, на котором предполагается применять нейтронный датчик для изучения распределения

паросодержания по его длине, следует избегать скачкообразных изменений свойств конструктивных элементов канала, что усложняет интерпретацию экспериментально измеренных величин.

Поступила в Редакцию 28/VI 1976 г.  
В окончательной редакции 13/XII 1976 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрова Л. Н. и др. См. настоящий вып., с. 164.
2. Юрова Л. Н., Смирнов В. Е. «Бюл. изобрет.», 1976, № 9, с. 133.
3. Смолин В. Н. и др. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Реакторостроение». Вып. 1/8. М., изд. ЦНИИатоминформ, с. 3.

#### К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ. ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСЕЙ

Содержание статей, направляемых в журнал «Атомная энергия», должно быть изложено с предельной ясностью и краткостью. Следует избегать повторения данных таблиц и графиков, а также представления численных результатов в виде таблиц и графиков одновременно.

Объем обзоров, как правило, не должен превышать 20 — 22 стр., оригинальных статей — 10 — 12 стр., аннотаций депонированных статей — 2 стр., писем в редакцию — 5 стр. машинописного текста (включая рисунки с подписями, таблицы и библиографию).

При подготовке рукописей авторы должны руководствоваться следующими правилами:

1. Тексты (среди них обязательно должен быть первый машинописный экземпляр) и иллюстрированные материалы представляются в четырех экземплярах в окончательно отработанном для печати виде. Текст должен быть отпечатан через два интервала по 28—29 строк на одной стороне листа с полями не уже 4 см; рукописные вставки не допускаются.

2. Оформление текста (написание формул, выделение греческих и латинских, строчных и прописных букв, сокращение слов и т. д.) производится в соответствии с общими правилами, принятыми для научно-технических журналов. Трудноразличимые в рукописном обозначении буквы и знаки должны быть пояснены на полях.

3. Единицы всех физических величин должны быть обозначены в системе СИ.

4. Прилагаемые к тексту таблицы нумеруются по порядку, каждая таблица должна иметь заголовок.

5. Рисунки выполняются черной тушью на бумаге размером 15×20 см; фотографии должны иметь контрастные изображения, размер фотографий 12×18 см.

6. Подписи к рисункам прилагаются на отдельном листе. В тексте должны быть ссылки на рисунки.

7. Цитируемая литература приводится в конце работы общим списком с указанием:

а) для журнальных статей — фамилий и инициалов авторов, названия журнала, года, номера тома, выпуска и страницы;

б) для книг — фамилий и инициалов авторов, полного названия книги, места издания, издательства и года издания; для иностранных книг указываются также данные русского перевода;

в) для статей в сборнике — фамилий и инициалов авторов статьи, названия сборника, инициалов и фамилий составителя или редактора сборника, части, выпуска, места издания, издательства, года и страницы.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

8. К статьям, обзорам и письмам в редакцию должны быть приложены рефераты, составленные по правилам реферативных журналов, с четкой сформулированной целью и результатами работы. Кроме того, рефераты к статьям и обзорам должны быть переведены на английский язык в строгом соответствии с русским рефератом).

9. Названия всех работ, присылаемых в редакцию (статьи, обзоры, депонированные статьи и письма в редакцию), должны быть переведены на английский язык, фамилии и инициалы авторов даны в английской транскрипции.

10. Тексты и рисунки должны быть подписаны всеми авторами. Необходимо указывать точный адрес, номер телефона, фамилию, полное имя и отчество всех авторов.

Редакция посылает автору только одну корректуру, которую необходимо вернуть в предельно короткий срок.

Рукописи, не соответствующие этим требованиям, не рассматриваются. Отклоненные статьи не возвращаются.