

УДК 621.039.562:621.039.524.44

Метод определения паросодержания в среде по регистрации замедленных ею нейтронов

ЮРОВА Л. Н., СМОЛИН В. Н., ШПАНСКИЙ С. В., ЕСИКОВ В. И., СМЕРНОВ В. Е., ШИШОВ В. П.

Объемное паросодержание ϕ является параметром, необходимым для расчета теплофизических характеристик трактов с пароводяной смесью. Для бесконтактного определения ϕ традиционно используется метод, основанный на ослаблении пароводяной смесью просвечивающего пучка γ -квантов [1, 2]. Однако слабое поглощение γ -излучения пароводяной смесью уменьшает крутизну зависимости измеряемого эффекта от паросодержания и делает измерительное устройство более чувствительным к воздействию возмущающих факторов.

Использование тепловых или надтепловых нейтронов [3—5] для просвечивания канала с пароводяной смесью затруднено из-за отсутствия компактных источников нейтронов. Отмеченные трудности и недостаточная точность бесконтактных методов определения паросодержания заставили обратить внимание на возможность использования для решения этой задачи зависимости потока рассеянных нейтронов от параметров водородсодержащей среды [6—8]. При рассеянии быстрых нейтронов водородсодержащей средой в ней появляются замедленные нейтроны, отсутствующие в спектре источника. Их число зависит от средней плотности $\bar{\rho}$ исследуемой среды, причем эта зависимость имеет высокую крутизну и может быть использована для практического определения средней плотности пароводяной смеси, которая связана с ϕ соотношением $\phi = (\rho' - \bar{\rho}) / (\rho' - \rho'')$, где ρ' и ρ'' — плотности фаз на линии насыщения. Описанный способ определения паросодержания можно назвать методом замедленных нейтронов (МЗН).

Одна из экспериментальных установок, реализующих МЗН (рис. 1), состоит из источника быстрых нейтронов, отражателя, окружающего канал с исследуемой средой, и счетчиков медленных нейтронов, в качестве которых могут быть использованы борные счетчики, например, типа СНМ-14. Отражатель предназначен для уменьшения утечки нейтронов из исследуемой среды. При определенных размерах отражатель увеличивает вероятность замедления нейтронов исследуемой средой и не создает при этом значительного фона замедленных в нем нейтронов.

Поэтому выбор материала и толщины отражателя является одной из задач экспериментального изучения МЗН.

Для оценок погрешностей МЗН представляет интерес рассмотреть влияние на результаты измерений таких факторов, как отклонение толщины стенки стального канала от номинала, режим течения исследуемой среды, проявляющийся как неоднородность распределения паросодержания по радиусу канала, а также неравномерность распределения паросодержания по длине, например, парогенерирующих каналов или в нестационарных режимах.

Использование пароводяной или воздушно-водяной смеси при исследовании МЗН затруднено, так как отсутствуют надежные способы определения параметров этих смесей. По этой причине применена парафино-воздушная смесь, имеющая близкие к воде нейтронно-физические свойства при равной объемной концентрации водорода. В такой ситуации их плотности связаны соотношением $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1,35 \rho_{\text{C}_{25}\text{H}_{52}}$.

Для определения плотности исследуемой среды с помощью реализующего МЗН устройства, которое в дальнейшем называется датчиком, используется полученная в специальном эксперименте градуировочная кривая датчика $n(\rho)$ — зависимость скорости счета нейтронов детекторами датчика от средней по сечению канала плотности исследуемой среды $\bar{\rho}$, равномерно заполняющей канал. С помощью этой зависимости можно количественно охарактеризовать влияние изучаемых факторов и оценить погрешности измерений. Так, через производную $dn(\rho)/d\rho$ и дисперсию скорости счета нейтронов σ_n можно выразить статистическую составляющую σ_ρ погрешности определения плотности:

$$\sigma_\rho = \sigma_n / [dn(\rho)/d\rho], \quad (1)$$

возникающую вследствие конечной интенсивности и случайного характера актов регистрации нейтронов.

Аппаратурную составляющую Δ , характеризующую вклад в $\bar{\rho}$ относительного изменения скорости счета нейтронов на s , %, не связанного с изменением плотности, введем соотноше-

$$\Delta = 0,01sn(\rho)/[dn(\rho)/d\rho]. \quad (2)$$

Аппаратурная составляющая обратно пропорциональна относительной чувствительности датчика $[1/n(\rho)] [dn(\rho)/d\rho]$. Чем меньше Δ при $s = \text{const}$, тем чувствительнее устройство к изменению плотности среды.

Влияние отклонений толщины стенки канала на результаты определения плотности среды может быть охарактеризовано вкладом неучтенного 10%-ного увеличения толщины m стенки в $\bar{\rho}$:

$$\varepsilon_m(\rho) = \frac{0,1m}{\bar{\rho}} \left[\frac{\partial n(\rho, m)}{\partial m} / \frac{\partial n(\rho, m)}{\partial \rho} \right]. \quad (3)$$

Оценка влияния неравномерности распределения плотности среды по радиусу канала

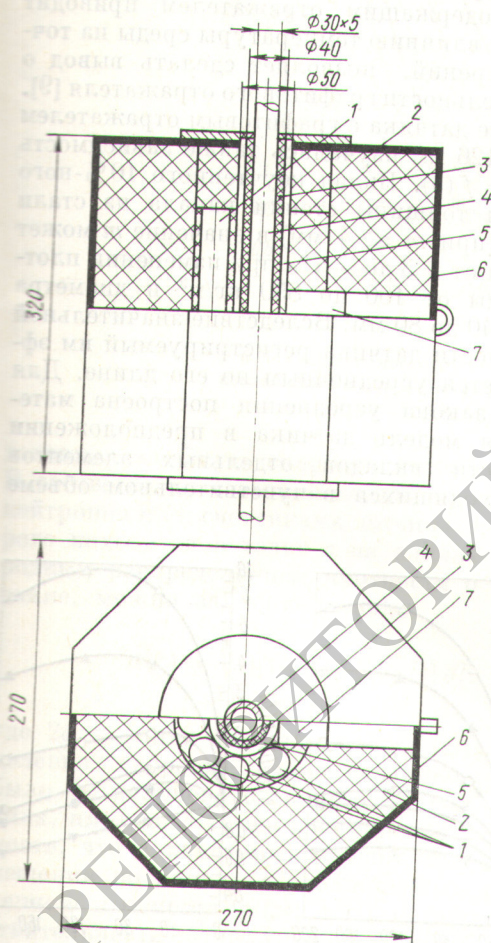


Рис. 1. Датчик для определения паросодержания в канале диаметром 30 × 5 мм:

1 — семь счетчиков нейтронов типа СМ-14; 2 — графитовый отражатель; 3 — тепловая изоляция асбест — пух; 4 — канал с исследуемой средой; 5 — зазор для продувки охлаждающего воздуха; 6 — слой свинца для защиты от фона тепловых нейтронов; 7 — $Pu - Be$ -источник нейтронов интенсивностью 5×10^6 нейтр./с

на измеряемое значение плотности может быть проведена по соотношению

$$\Delta_T = [(\rho_T - \rho_K)/\rho_K] \cdot 100\%, \quad (4)$$

где ρ_T и ρ_K — соответственно средние по сечению плотности среды, соответствующие одной и той же скорости регистрации нейтронов, при заполнении канала гомогенной исследуемой средой и в случае, когда вся масса исследуемой среды сосредоточена в кольцевом слое на внутренней поверхности канала с максимальной плотностью в теле кольца.

При изучении влияния материала и толщины отражателя нейтронов на свойства датчика строились градуировочные зависимости скорости счета от плотности среды. Для этого использовалась парафино-воздушная смесь, упакованная в изготовленные из тонкой бумаги контейнеры диаметром от 40 до 100 мм. Полученные градуировочные зависимости (рис. 2) обладают высокой крутизной и вполне могут быть использованы для определения плотности среды.

По результатам градуировки различных модификаций датчиков рассчитаны производные $dn(\rho)/d\rho$ и по формулам (1) и (2) построены зависимости при $\rho = \text{const}$:

$$f(b) = \Delta(b=0)/\Delta(b); \quad (5)$$

$$f(b) = \sigma_\rho(b=0)/\sigma_\rho(b), \quad (6)$$

которые характеризуют уменьшение аппаратурной (5) и статистической (6) составляющих погрешности определения плотности при наличии отражателя толщиной b по сравнению с датчиком без отражателя. Для различных модификаций датчика эти зависимости имеют вид, аналогичный изображенному на рис. 3. Характерными особенностями зависимости (6) являются существенное снижение статистической погрешности и тенденция к выходу на постоянное значение при увеличении толщины отражателя. В поведении зависимости (5) наблюдается максимум, смещающийся в область малой толщины отражателя при увеличении плотности среды.

Для датчиков с отражателем из оргстекла отмеченные особенности поведения зависимостей (5) и (6) проявляются при толщине отражателя в 6—8 раз меньшей, а достижимая кратность уменьшения σ_ρ и Δ ниже, чем для датчиков с графитовым отражателем.

На рис. 4 изображены зависимости $f(\bar{\rho}) = \sigma_\rho(\bar{\rho}, b=0)/\bar{\rho}$ и $f(\bar{\rho}) = \Delta(\bar{\rho}, b=0)/\bar{\rho}$ для датчиков без отражателей. При расчете σ_ρ по формуле (1) использовались реальные усло-

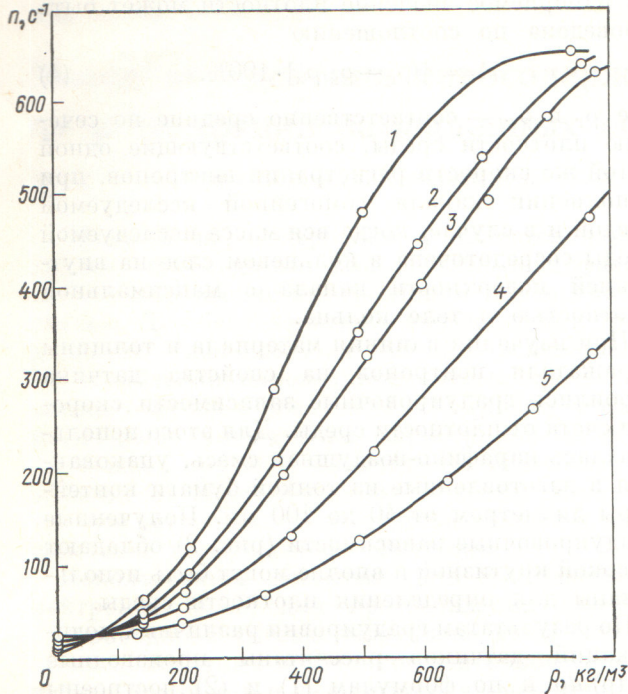


рис. 2. Зависимость скорости счета нейтронов от плотности однородной парафино-воздушной смеси (диаметр контейнера a и толщина графитового отражателя b различны):
1 — $b = 100, 80, 68, 50$ и 40 мм; $b = 126, 126, 141, 141$ и 26 мм соответственно

вия эксперимента: интенсивность источника $Q = 2 \cdot 10^6$ нейтр./с, число счетчиков типа СМ-14 в датчике $K = 3$, время регистрации нейтронов $\tau = 100$ с. Аппаратурная составляющая вычислена при $s = 1\%$. Для оценки погрешности определения ρ датчиком с графитовым отражателем толщиной b (мм) необходимо значения $\sigma_\rho(\bar{\rho}, b = 0)/\bar{\rho}$ и $\Delta(\bar{\rho}, b = 0)/\bar{\rho}$ разделить на соответствующие отношения $\sigma_\rho(b = 0)/\sigma_\rho(b)$ и $\Delta(b = 0)/\Delta(b)$, взятые с рис. 3. При переходе к новым условиям эксперимента оценку статистической составляющей следует проводить по формуле

$$\sigma_{\text{общ}}/\rho = (\sigma_\rho/\rho) \sqrt{(QK\tau)/(Q_n K_n \tau_n)}, \quad (7)$$

где «н» обозначает новые условия эксперимента. Аппаратурная составляющая погрешности определения плотности при этом не изменяется. Увеличение диаметра контейнера с исследуемой средой обуславливает уменьшение относительных составляющих погрешностей по сравнению с оценкой при использовании зависимости на рис. 3.

Зависимость $\Delta_\tau = f(\rho)$ имеет максимум внутри интервала изменения ρ , а на его границах обращается в нуль. Максимальное значение Δ_τ

зависит от диаметра канала и материала отражателя. Так, для датчика с графитовым отражателем при диаметре канала 80 и 40 мм $\Delta_{\tau, \text{макс}} = 3,6$ и 1% соответственно. Отражатель из оргстекла увеличивает $\Delta_{\tau, \text{макс}}$ примерно вдвое. Переход от равномерного распределения плотности к кольцевому вызывает смещение градуировочной зависимости в область больших плотностей.

Сопоставление результатов изучения влияния толщины и материала отражателя датчика на погрешности определения ρ с учетом термостойкости графита, обеспечивающей восстановление функций датчика после возможного аварийного перегрева, и постоянства сечения рассеяния нейтронов графитом, что по сравнению с водородсодержащим отражателем приводит к меньшему влиянию температуры среды на точность измерений, позволяет сделать вывод о предпочтительности графитового отражателя [9].

На макете датчика с графитовым отражателем толщиной 126 мм изучалась также зависимость $\varepsilon_\rho(m, \rho) = f(\rho)$. Вклад неучтенного 10%-ного увеличения толщины стенки канала из стали 1X18H9T (при $m \leq 4$ мм) в значение m может изменяться от $+3$ до -4% при изменении плотности среды от 100 до 850 кг/м³ и диаметра канала от 40 до 80 мм. Вследствие значительной протяженности датчика регистрируемый им эффект является усредненным по его длине. Для описания закона усреднения построена математическая модель датчика в предположении аддитивности вкладов отдельных элементов среды, находящихся в чувствительном объеме

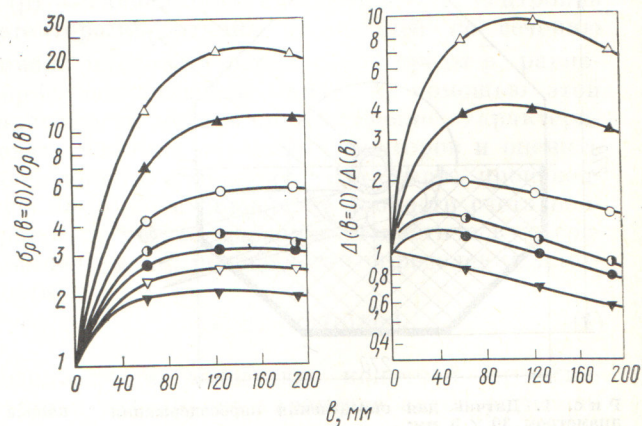
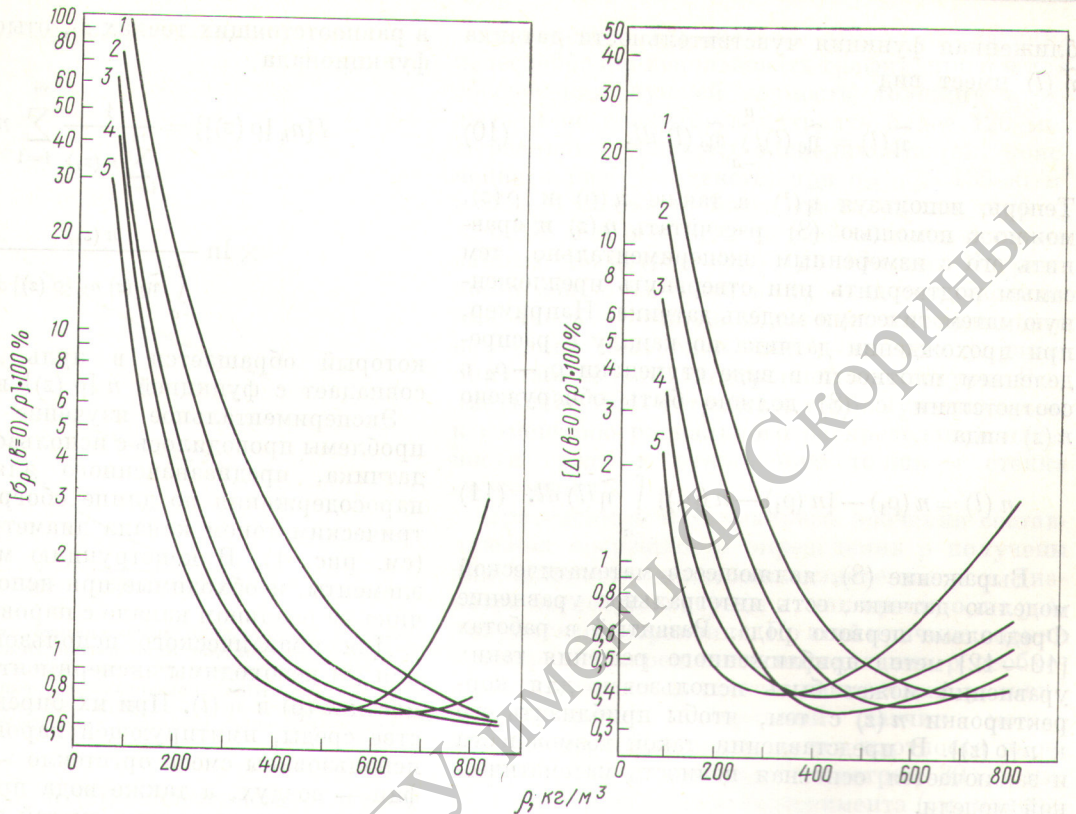


рис. 3. Зависимость отношений $\sigma_\rho(b=0)/\sigma_\rho(b)$ и $\Delta(b=0)/\Delta(b)$ датчика для исследуемой среды в контейнере диаметром 40 мм от толщины графитового отражателя нейтронов при плотности парафино-воздушной смеси 100 (Δ), 200 (\blacktriangle), 300 (\circ), 400 (\bullet), 500 (\bullet), 600 (∇) и 700 кг/м³ (\blacktriangledown)



Р и с. 4. Зависимости $\sigma_p(b=0)/\rho$ и $\Delta(b=0)/\rho$ для датчиков без отражателей при различных диаметрах контейнеров с парафино-воздушной смесью:
1 — 5 — $d = 40, 50, 68, 80$ и 100 мм соответственно

датчика, в общую скорость счета нейтронов. В соответствии с этой моделью скорость счета нейтронов $n(z)$ счетчиками датчика, центр которого находится в точке z на канале с неоднородным распределением плотности $\rho(z)$ по его длине, можно записать в виде

$$n(z) = \int_{-a}^a \eta(l) n[\rho(z-l)] dl, \quad (8)$$

где $2a$ — длина датчика, м; $n[\rho(z)]$ — распределение скорости счета нейтронов, которое было бы получено с помощью локального датчика, имеющего ту же градуировочную зависимость, что и изучаемый датчик, при его перемещении по каналу с неоднородным распределением плотности $\rho(z)$; $\eta(l)$ — функция чувствительности датчика, характеризующая вклад элемента среды dl , находящегося на расстоянии l от центра датчика, в общую скорость счета нейтронов.

Функция $\eta(l)$ — четная вследствие симметрии датчика относительно его центра и вне

датчика равна нулю. Она нормирована на единицу. Приближенная функция чувствительности $\tilde{\eta}_0(l)$ определяется экспериментально при перемещении датчика по трубопроводу с распределением плотности вида

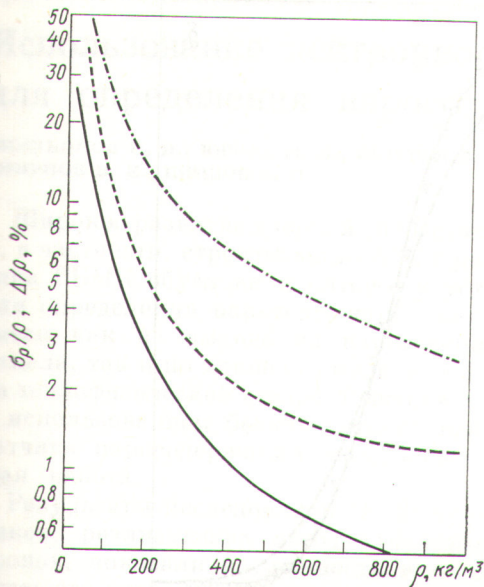
$$\rho(z) = \begin{cases} \rho_0 & \text{вне возмущения } \Delta l, \\ \rho & \text{в области возмущения.} \end{cases}$$

Подставив это выражение в формулу (8) и разбив относительно среднего значения $\tilde{\eta}_0$ на интервале Δl , получим выражение для $\tilde{\eta}_0(l)$:

$$\tilde{\eta}_0(l) = \frac{1}{\Delta l} \frac{n(l) - n(\rho_0)}{n(\rho) - n(\rho_0)}, \quad (9)$$

где $n(l)$ — скорость счета нейтронов, когда возмущение Δl находится на расстоянии l от центра датчика; $n(\rho_0)$ и $n(\rho)$ — соответственно скорости счета нейтронов при равномерном заполнении чувствительного объема датчика средой плотностью ρ_0 и ρ .

Значение $\tilde{\eta}_0(l)$ необходимо разделить на нормирующее выражение. Нормированная при-



Р и с. 6. Зависимость относительных аппаратурной и статистической составляющих погрешности определения плотности эквивалентной пароводяной смеси от плотности: — — — аппаратурная составляющая МЗН; — — — статистическая составляющая МЗН; — — — — — аппаратурная составляющая при определении плотности узким пучком γ -квантов

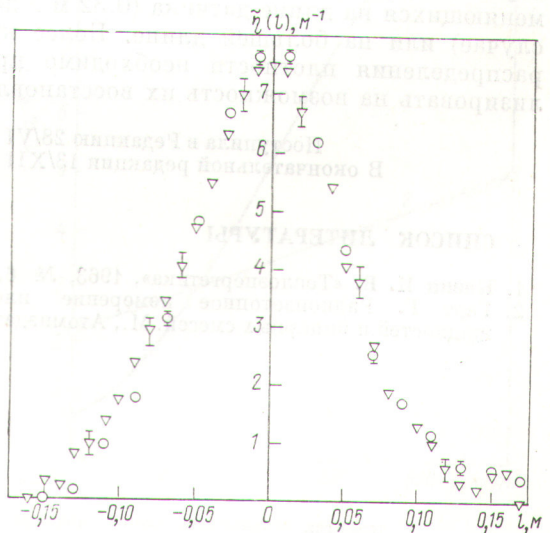
восстановления $n_k[\rho(z)]$ свидетельствует о проблематичности применения алгоритма (12) для восстановления разрывной функции $n[\rho(z)]$, соответствующей ступенчатому распределению $\rho(z)$.

Если в качестве исследуемого распределения $\rho(z)$ выбрано плавное распределение, которому соответствует функция $n[\rho(z)]$, изображенная на рис. 8, б, то с помощью датчика будет обнаружено распределение $n(z)$, отличающееся от $n[\rho(z)]$ на 10% при $z = 0,35$ м. Восстановленное с помощью алгоритма (12) распределение $n_k[\rho(z)]$ совпадает с исходным $n[\rho(z)]$ с погрешностью не более 0,5%. Полученный результат свидетельствует о том, что $\rho(z)$, для которого $n[\rho(z)]$ плавно изменяется на расстоянии равном или большем длины датчика, можно изучать с его помощью, определяя локальные значения средней по сечению плотности исследуемой среды. Отсутствие более строгих формулировок и достаточных условий восстанавливаемости функции $n[\rho(z)]$ дает основания рекомендовать для выяснения этого вопроса прямую проверку проведением расчетного эксперимента.

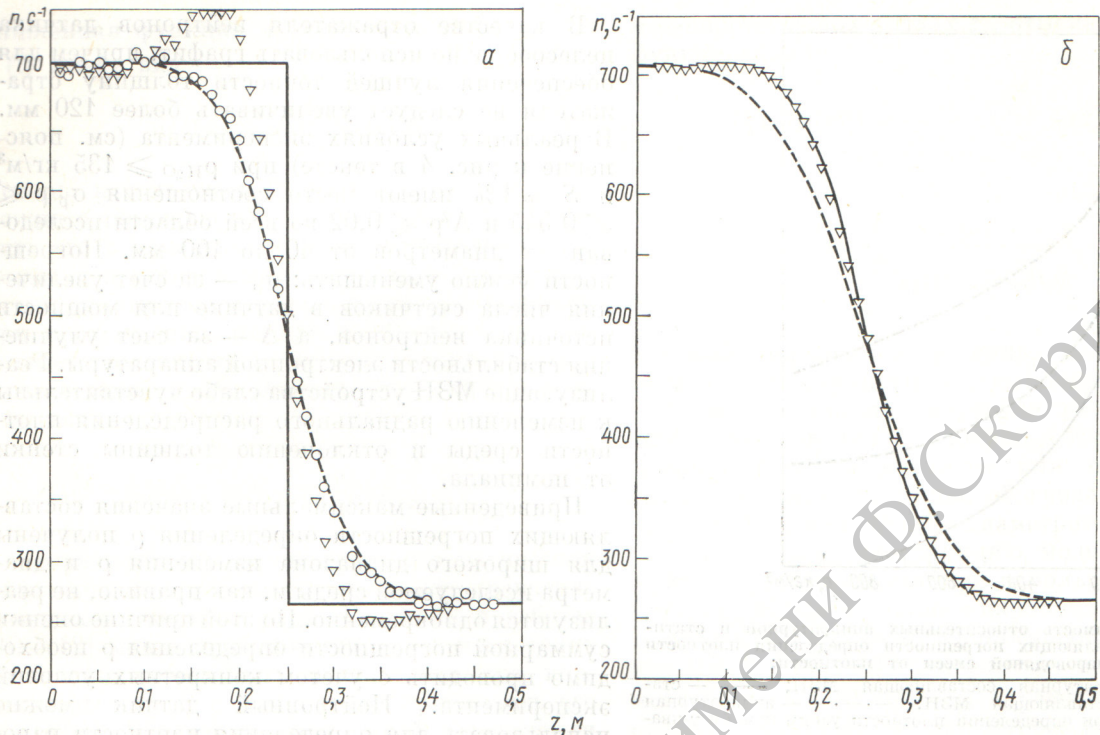
Результаты изучения некоторых особенностей устройств, реализующих МЗН, приводят к следующим выводам.

В качестве отражателя нейтронов датчика целесообразно использовать графит, причем для обеспечения лучшей точности толщину отражателя не следует увеличивать более 120 мм. В реальных условиях эксперимента (см. пояснение к рис. 4 в тексте) при $\rho_{\text{H}_2\text{O}} \geq 135 \text{ кг/м}^3$ и $S = 1\%$ имеют место соотношения $\sigma_p/\rho \leq 0,045$ и $\Delta/\rho \leq 0,02$ во всей области исследованных диаметров от 40 до 100 мм. Погрешности можно уменьшить: σ_p — за счет увеличения числа счетчиков в датчике или мощности источника нейтронов, а Δ — за счет улучшения стабильности электронной аппаратуры. Реализующие МЗН устройства слабо чувствительны к изменению радиального распределения плотности среды и отклонению толщины стенки от номинала.

Приведенные максимальные значения составляющих погрешности определения ρ получены для широкого диапазона изменения ρ и диаметра исследуемой среды и, как правило, не реализуются одновременно. По этой причине оценки суммарной погрешности определения ρ необходимо проводить с учетом конкретных условий эксперимента. Нейтронный датчик можно использовать для определения плотности пароводяной смеси в канале диаметром 30×5 мм. В реальных условиях эксперимента (см. пояснение к рис. 5 и 6 в тексте) при $\rho \geq 100 \text{ кг/м}^3$ имеют место соотношения $\sigma_p/\rho \leq 0,08$ и $\Delta/\rho \leq 0,14$, причем они быстро уменьшаются с увеличением ρ . Нейтронный датчик может быть



Р и с. 7. Функция чувствительности датчика: \circ — $\rho_0 = 970$ и $\rho = 78 \text{ кг/м}^3$; ∇ — $\rho_0 = 0$ и $\rho = 970 \text{ кг/м}^3$



Р и с. 8. Результаты расчетов $n(z)$ и восстановления $n[\rho(z)]$ по $n(z)$ при прохождении через датчик распределения плотности в виде ступеньки (а) и плавного распределения (б): — исходное распределение $n[\rho(z)]$; \circ , — экспериментальное и рассчитанное распределения $n(z)$; ∇ — восстановленное по соотношению (12) распределение $n[\rho(z)]$

использован для определения средних по сечению канала, совпадающему с центром датчика, значений плотности пароводяной смеси при изучении распределений плотности, плавно меняющихся на длине датчика (0,32 м в данном случае) или на большей длине. Более крутые распределения плотности необходимо проанализировать на возможность их восстановления.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казин И. В. «Теплоэнергетика», 1963, № 6, с. 25.
2. Гарт Г. Радиоизотопное измерение плотности жидкостей и бинарных смесей. М., Атомиздат, 1975.
3. Harms A., Hancox W. «J. Appl. Phys.», 1971, v. 42, N 10, p. 4080.
4. Hancox W., Harms A. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1971, v. 14, N 2, p. 699.
5. Бартоломей Г. Г., Алхутов М. С., Байбаков В. Д. «Теплоэнергетика», 1975, № 2, с. 72.
6. Dennis J. AERE, EL/M-97, 1957.
7. Jackson C., Allemann R., Spear W. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1968, v. 11, N 6, p. 366.
8. Бабикина Ю. Ф. и др. «Изотопы в СССР», 1967, № 6, с. 12.
9. Юрова Л. Н., Смирнов В. Е. «Бюл. изобрет.», 1976, № 9, с. 133.
10. Тараско М. З. Препринт ФЭИ-156. Обнинск, 1969.
11. Тараско М. З., Крамер-Агеев Е. А., Тихонов Е. Б. В кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 11. М., Атомиздат, 1970, с. 125.
12. Дорошенко Г. Г., Зайтов А. М., Тараско М. З. В кн.: Прикладная ядерная спектроскопия. Вып. 3. М., Атомиздат, 1972, с. 233.