

ДВУХИЗОТОПНЫЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ГАММА-ПЛОТНОМЕР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТРЕХФАЗНЫХ ПОТОКОВ НЕФТЬ–ВОДА–ГАЗ

*Б. Н. Свешников^а, С. Н. Смирнов^{б,1}, А. Ю. Филиппов^{в,2},
Ю. П. Филиппов^{а,3}*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт физико-технических проблем, Дубна, Россия

^в Научно-исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва

Рассмотрена работа созданного гамма-плотнмера с номинальным диаметром DN 100, предназначенного для диагностики трехфазных потоков нефть–вода–газ бессепарационным способом, когда компонентный состав определяется посредством спектрометрического анализа гамма-излучения с двумя различными энергиями фотонов. В качестве гамма-источников используются изотопы ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs, установленные в одном корпусе, а гамма-детектор выполнен на основе кристалла ВГО диаметром и высотой 40 мм. Приведены сведения о конструкции, измерительной электронике и основных характеристиках гамма-плотнмера. Представлен метод температурной стабилизации зарегистрированных интенсивностей излучения для обоих изотопов в диапазоне температур окружающей среды от 10 до 35 °С.

Operation of the created gamma-densitometer of nominal diameter DN 100 is considered. This device is intended for diagnostics of three-phase oil–water–gas flows with separationless method, when the component composition is determined by means of spectrometric analysis of gamma irradiation with two different photon energies. The isotopes ²⁴¹Am and ¹³⁷Cs are used as gamma sources, installed in the same housing, and the gamma detector is made on the basis of a ВГО crystal of diameter and height of 40 mm. Information about the design, measuring electronics and main characteristics of the gamma-densitometer is given. The method of temperature stabilization of the registered radiation intensities for both isotopes is presented in the range of ambient temperatures from 10 to 35 °С.

PACS: 82.80.Ms; 29.30.Kv; 07.75.+h; 89.30.aj; 89.30.an

ВВЕДЕНИЕ

Для контроля массового расхода сырой нефти в нефтедобывающей отрасли наряду с крупногабаритными сепарационными групповыми замерными установками [1] все большее применение находят компактные бессепарационные трехфазные расходомеры нефть–вода–газ. Принцип работы таких систем диагностики на основе,

¹E-mail: orp@iftp.ru

²E-mail: forcs2231@gmail.com

³E-mail: fyp@dubna.ru

например, комбинации сужающего устройства (СУ) и гамма-плотномера (ГП), работающего с применением гамма-источников двух различных энергий, представлен в [2–4]. Компонентный состав трехфазного потока φ , w и α определяется посредством трех соотношений, полученных на основе описания процессов, например, в [2] в зависимости от линейных коэффициентов поглощения гамма-квантов с двумя различными энергиями фотонов в газе, воде и нефти, а также интенсивностей гамма-излучений (начальных и прошедших через поток) с двумя различными энергиями, где $\varphi = A_g/(A_g + A_l)$ — истинное объемное газосодержание, A — площадь поперечного сечения, индексы g и l относятся к газу и жидкости, $w = (\rho - \rho_o)/(\rho_w - \rho_o)$ — объемная обводненность, ρ — средняя плотность, индексы w и o относятся к воде и нефти, $\alpha = (1 - w - \varphi)$ — объемное нефтесодержание. Для определения объемного расхода смеси Q используется сужающее устройство, работающее в соответствии с четвертым упрощенным соотношением при горизонтальной ориентации многофазного потока [5]: $\Delta P = \xi^{-2}\rho Q^2 + \Delta P_{\text{fr}}$, где ΔP — измеренный полный перепад давления на сужающем устройстве, складывающийся из гидродинамического перепада $\Delta P_{\text{hd}} = \xi^{-2}\rho Q^2$ за счет сужения потока в СУ, оцениваемого из закона Бернулли в предположении нулевой вязкости потока, и потерь давления за счет трения — ΔP_{fr} , $\xi = A_1 A_2 [2/(A_1^2 - A_2^2)]^{1/2}$ — геометрический параметр СУ, A_1 и A_2 — большее и меньшее сечения конического СУ. Влияние последней составляющей тем существеннее, чем больше вязкость потока, что особенно характерно для нефти, вязкость которой в несколько раз больше, чем воды.

Напомним основные принципы анализа компонентного состава многофазных потоков. Так, ослабление параллельного монохроматического пучка электромагнитного излучения определяется законом Ламберта–Бера [4]:

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \quad (1)$$

где I_0 — начальная интенсивность излучения; I — интенсивность пучка, прошедшего расстояние x через вещество; μ — линейный коэффициент поглощения. Часто используется массовый коэффициент поглощения μ/ρ , где ρ — плотность вещества. Значение массового коэффициента поглощения для смесей и сложных веществ можно найти по формуле

$$\mu/\rho = \sum w_i (\mu/\rho)_i, \quad (2)$$

где w_i — массовая доля i -го компонента и $(\mu/\rho)_i$ — соответствующий массовый коэффициент поглощения. Из (2) можно получить значение линейного коэффициента поглощения для смесей и сложных веществ

$$\mu = \sum \mu_i \alpha_i, \quad (3)$$

где α_i — объемная доля i -го компонента и μ_i — соответствующий массовый коэффициент поглощения. Значения массовых коэффициентов поглощения можно рассчитать теоретически или с использованием, например, таблицы Национального института стандартов и технологий (NIST) США.

В частности, для двухфазной смеси вода–газ объемное газосодержание потока $\beta = Q_g/(Q_g + Q_w)$ связано с соответствующей безразмерной характеристикой ГП β_γ

$$\beta_\gamma = 1 - \ln(I_g/I) / \ln(I_g/I_w) \quad (4)$$

кубической параболой, приведенной, например, в [5], где I — измеренная интенсивность прошедшего гамма-излучения, а индексы g и w относятся к газу и воде, Q — объемный расход.

При создании рассматриваемых гамма-плотномеров полезным служит соотношение для определения ошибки, например, обводненности нефтеводяной смеси [6]:

$$\delta w = \pm \frac{1}{d(\mu_o - \mu_w) \sqrt{tN^*}}, \quad (5)$$

где d — внутренний диаметр трубы; μ_o, μ_w — линейные коэффициенты поглощения для нефти и воды соответственно; t — время измерения; N^* — количество фотонов в единицу времени на входе в детектор. Это соотношение получено для квазистационарных потоков с расслоенным или кольцевым режимами течения [6] при условии, что погрешность определяется лишь статистической ошибкой. Из (5) видно, что ошибка δw обратно пропорциональна диаметру расходомера и корню квадратному из интенсивности источника и времени счета.

При создании экспериментальных гамма-плотномеров для диагностики трехфазных потоков нефть–вода–газ необходимо учитывать специфику требований к измерительной системе. Такая система должна обеспечивать измерение температур потока и корпуса расходомера, давления потока P и перепада давления ΔP через СУ, реагировать на возможные колебания параметров в потоках с газом [5, 7] и усреднять измеренные параметры, реализовывать довольно сложный алгоритм обработки первичных сигналов системы с целью получения искоемых величин компонентного состава и расходов компонентов трехфазных потоков, а также передавать полученную информацию на некий сервер по стандартному протоколу обмена данных. Систему измерений сигналов СУ — T , P и ΔP целесообразно создавать на базе промышленного компьютера (ПК) во взрывобезопасном корпусе, как это сделано, например, в [7]. Процессорная плата ПК снабжена флэш-дискон, стандартными разъемами для подключения TV-монитора и клавиатуры, а также интерфейсами Ethernet, USB, RS232 и RS485, а электроника спектрометрического ГП с двумя энергиями гамма-квантов должна быть совместима с ПК и не перегружать его процессор, функции которого, как видно, довольно обширны.

Цель работы состояла в поиске или создании ГП, удовлетворяющего указанным требованиям, исследовании его характеристик при заполнении веществами различной плотности и реализации способа температурной компенсации сигналов гамма-детектора.

МАКЕТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ГАММА-ПЛОТНОМЕРА

В доступной литературе информация подобного рода фирм-производителей носит, как правило, рекламный характер, поэтому систему диагностики трехфазных потоков нефть–вода–газ пришлось создавать самостоятельно. Макет такой системы приведен в [7]. Он представляет собой комбинацию конического СУ (большой и меньший диаметры — 98 и 70 мм) с блоком электроники на базе ПК во взрывобезопасном корпусе и ГП, смонтированного на трубе из нержавеющей стали с внутренним диаметром 98 мм в соответствии с соотношением (5). Гамма-источники ^{241}Am и ^{137}Cs с активностями и энергиями 450 и 5 мКи и 59,5 и 662 кэВ соответственно расположены

в одном стандартном корпусе БГИ-50П, конструкция которого обеспечивала коллимированный пучок. Корпус БГИ-50П снабжен защитным затвором «открыть–заккрыть». Для обеспечения работоспособности источника с меньшей энергией гамма-квантов по специальной технологии были изготовлены диаметрально противоположные «окна», рассчитанные на избыточное давление 5 МПа. Блок детектирования излучения, специально созданный в Институте физико-технических проблем (ИФТП) Дубны, располагался оппозитно корпусу БГИ-50П. Этот блок детектирования с так называемыми энергетическими воротами для обоих источников работал совместно с ноутбуком, на котором производилась обработка спектров полученных сигналов, а их зарегистрированные интегральные характеристики (величины площадей под энергетическими пиками, отнесенные ко времени набора отсчетов детектора) выводились на экран и записывались в память в виде показаний с размерностями «отсчет в секунду» — срс. В качестве сцинтиллятора в блоке детектирования использовался кристалл NaI, который предназначался для работы в лабораторных условиях — стенд многофазных потоков ГЭТ195-2011, упомянутый в [7]. Внешний вид ГП во время испытаний на стенде представлен на рис. 1. Поскольку в помещении стенда температура должна изменяться не часто и не существенно, температурная компенсация отклика NaI производилась по мере необходимости вручную изменением положения энергетических ворот. Примеры успешного практического применения отдельных составляющих гамма-плотнера (^{241}Am или ^{137}Cs) представлены в [5, 7] в качестве средств диагностики двухфазных потоков нефть – пластовая вода, эсол–вода, вода–воздух, а также сжиженного природного газа (СПГ). В частности, система диагностики двухфазных потоков нефть – соленая вода на базе изотопа ^{137}Cs и конического СУ удовлетворяет требованиям ГОСТ [8] в диапазоне w от 0 до 95 % [7].

Недостатки макета ГП, который в полном объеме не удовлетворяет приведенным выше техническим требованиям, очевидны. В связи с этим электроника детектора ГП была существенно доработана в ИФТП. Кроме того, кристалл NaI гигроскопичен [9], что требует вибростойкой и герметичной оболочки.



Рис. 1. Внешний вид макета спектрометрического гамма-плотнера во время испытаний на стенде многофазных потоков ГЭТ195-2011, ВНИИР (Казань)

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ГАММА-ПЛОТНОМЕР

В усовершенствованном гамма-плотномере блок гамма-источников остался прежним. В блоке детектирования, прежде всего, сцинтиллятор NaI был заменен на кристалл из германата висмута ВГО диаметром и высотой 40 мм, который не гигроскопичен, отличается большей радиационной стойкостью и существенно меньшим комптоновским рассеянием гамма-квантов ^{137}Cs . Кроме того, благодаря высокой плотности и большому эффективному атомному номеру он превосходит йодид натрия в 1,27 раза по эффективности регистрации по пику полного поглощения гамма-квантов, например, с энергией 368 кэВ при несколько большем времени высвечивания (в 1,2 раза) [9].

Блок-схема гамма-детектора представлена на рис. 2 [10]. Излучение двух источников взаимодействует с веществом кристалла ВГО, что приводит к вспышке света, преобразующейся в электрический импульс с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ. Сигнал с ФЭУ поступает на вход зарядочувствительного предварительного усилителя ПУ, где он преобразуется в импульс напряжения и фильтруется. С выхода ПУ сигнал подается на входы четырех компараторов блока дискриминаторов уровня БДУ. На входы У1–У4 БДУ подаются четыре ШИМ-сигнала с выходов микроконтроллера МК. В БДУ ШИМ-сигналы фильтруются и используются в качестве опорных уровней компараторов. Выходные импульсы компараторов ДУ1–ДУ4 подаются на счетные входы четырех таймеров МК. Каждый счетный таймер МК считает число импульсов ПУ, превышающих соответствующий опорный уровень, пришедших за время измерения.

Результаты счета в виде 32-разрядных чисел сохраняются в памяти МК по окончании времени измерения. Аналоговый сигнал, пропорциональный высокому напряжению ФЭУ, подается на вход УПР БВН с выхода ЦАП (цифроаналоговый преобразователь) МК. Время измерения, опорные уровни и значение высокого напряжения задаются программно из канала RS485 и сохраняются по отдельной команде канала в энергонезависимой памяти МК [10]. По кабелю RS485 сигналы передаются в процессорную плату промышленного компьютера (ПК) в виде отсчетов в каждом канале.

Световой контакт между входным окном ФЭУ и торцом кристалла ВГО обеспечен посредством специальной смазки и фиксирующего держателя. Температура блока детектирования рядом с ВГО контролируется температурным датчиком, размещенным в плате электроники.

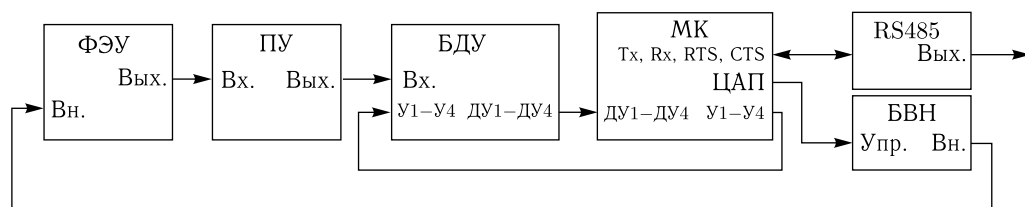


Рис. 2. Блок-схема блока детектирования усовершенствованного спектрометрического гамма-плотномера: ФЭУ — фотоэлектронный умножитель; ПУ — предварительный усилитель; БДУ — блок дискриминаторов уровня; МК — микроконтроллер STM32F100; RS485 — гальванически развязанный драйвер шины RS485; БВН — блок высокого напряжения

Блок детектирования обеспечивает регистрацию гамма-излучения в диапазоне энергий от 50 до 1500 кэВ и диапазоне мощностей эквивалентной дозы от 0,09 до 50,0 мкЗв/ч. Рабочий диапазон температур окружающей среды — от 5 до 35 °С. Передача данных спектра из блока детектирования на процессорную плату ПК осуществляется посредством непрерывной передачи всего буфера спектра или страничной передачи. Непрерывная передача реализована для спектров с размерами 256, 512 и 1024 канала.

Блок-схема электроники трехфазного расходомера показана на рис. 3. Питание блока детектора 9, передача первичных данных спектров ^{241}Am и ^{137}Cs и температуры блока детектирования $T_{\text{бд}}$, а также обмен данными осуществляется по кабелю 10. Питание ПК 6 производится постоянным напряжением 24 В. ПК 6 включает стандартную плату РСА-6763VG с процессорной системой AMD G-series T16R с пониженным потреблением [11] и две платы собственного производства для измерения температур потока и корпуса сужающего устройства 7, а также давления и перепада давления через СУ. При необходимости ПК может быть снабжен дополнительными стандартными платами для передачи сигналов, например, радиомодемом и восьмиканальным ЦАП для выдачи стандартных аналоговых сигналов. Окончательная обработка спектров и реализация алгоритма обработки всех сигналов осуществляется процессорной платой ПК. Обмен данными между ПК 6 и сервером 8 реализован по Ethernet-кабелю 14 в соответствии со стандартным протоколом TCP/IP. Такая конфигурация электроники рассчитана на работу в обогреваемых помещениях или в специальных термокамерах с поддержанием температуры в пределах $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$. Температура блока детектирования $T_{\text{бд}}$ может регистрироваться ежесекундно или по заданному алгоритму.

В качестве канала связи в МК используется интерфейс RS485 на скорости 57600 кбит/с. Минимальное время набора данных в МК не превышает 100 мс. Так

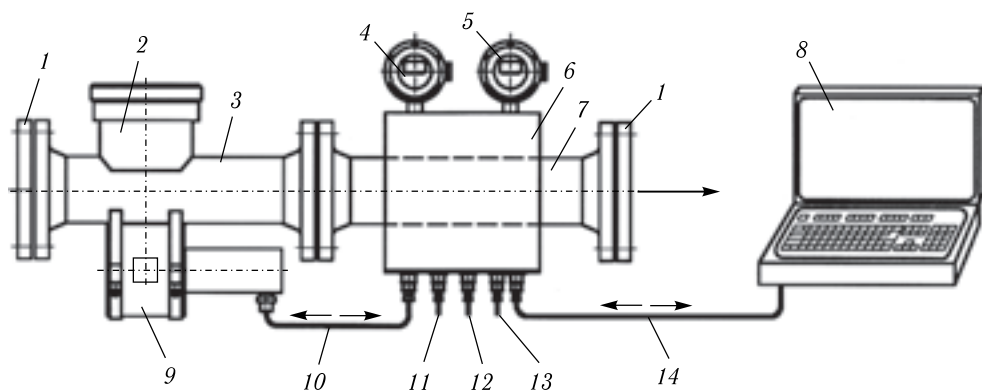


Рис. 3. Блок-схема электроники трехфазного расходомера нефть–вода–газ: 1 — соединительный фланец; 2 — блок гамма-источников; 3 — труба из стали 12X18H9T с внутренним диаметром 98 мм; 4 — преобразователь давления; 5 — преобразователь перепада давления; 6 — взрывобезопасный корпус промышленного компьютера (ПК); 7 — сужающее устройство (СУ); 8 — ноутбук или сервер; 9 — блок гамма-детектора; 10 — кабель питания и обмена данными через RS485; 11 — разъем температурных датчиков потока и корпуса СУ; 12 — разъем датчиков давления и перепада давления; 13 — питание ПК 24 В DC; 14 — Ethernet-кабель обмена данными по протоколу TCP/IP

как объем измеренных данных составляет 4096 байт (1024 четырехбайтных слова), то на передачу измеренных данных из МК в ПК уходит около 800 мс. Таким образом, минимальное время набора данных системы (одна временная точка) составляет не более 1 с. Программа в ПК по каналу связи настраивает МК на заданный режим работы и запускает измерение. Во время работы МК происходит измерение сигналов температурных датчиков и датчиков давления и перепада давления через СУ. По окончании набора измерений в МК программа в ПК вычитывает полученные данные по каналу связи, усредняет их, рассчитывает искомые величины компонентного состава и расходов измеряемого трехфазного потока нефть–вода–газ и производит отображение измеренных и расчетных величин в текстовом и графическом виде.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве примера амплитудные спектры ^{241}Am и ^{137}Cs с воздухом внутри ГП при атмосферном давлении (1 бар) и температуре около 20°C приведены на рис. 4. Левый край шумов до пятого канала удален дискриминатором нижнего уровня, и сигналы здесь не обрабатываются и не отображаются на шкале спектрометра. Из рис. 4 видно, что нижняя ширина спектра ^{241}Am занимает примерно 45 каналов (50–5) при амплитуде несколько большей, чем 70 000 отсчетов, а для ^{137}Cs — ~ 125 каналов (425–300) соответственно при амплитуде около 20 000 отсчетов. При этом площади под обоими энергетическими пиками, отнесенными ко времени набора данных, примерно одинаковы, что будет показано ниже. Замена вещества внутри ГП на более плотную среду приводит к соответствующим снижениям амплитуд пиков полного поглощения при сохраняющейся нижней ширине энергетических пиков. В качестве

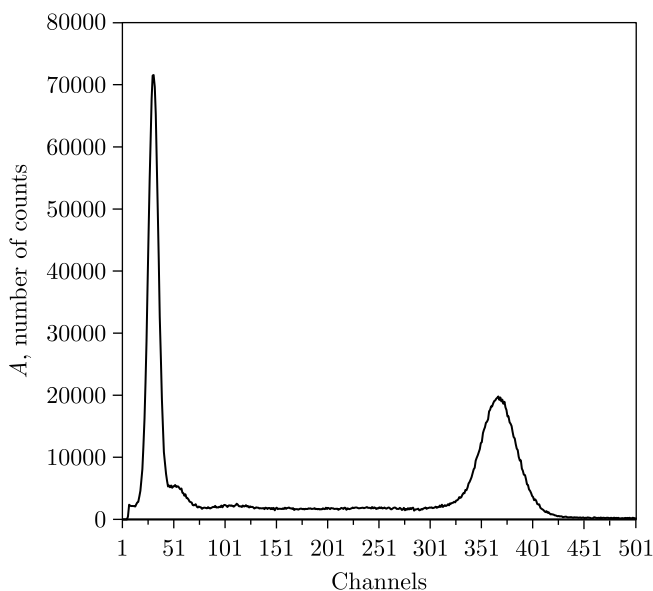


Рис. 4. Амплитудные спектры ^{241}Am и ^{137}Cs (пики полного поглощения гамма-квантов) с атмосферным воздухом внутри при температуре $\sim 20^\circ\text{C}$ и времени набора данных 60 с

Амплитуды пиков поглощения ^{241}Am и ^{137}Cs в отсчетах для различных веществ при температуре окружающей среды около 20°C и времени набора данных в детекторе 60 с

Среда	Воздух, $P = 1$ бар	Эксол D100	Вода водопроводная	10%-й раствор NaCl в воде
^{241}Am	71000	21300	16200	12730
^{137}Cs	19800	11500	10950	10410

примера амплитуды пиков поглощения для различных веществ представлены в таблице. Однако стабильности воспроизводства этих амплитуд были недостаточны для решения поставленной задачи.

Для дальнейшего анализа взаимодействия гамма-квантов двух энергий с различными веществами использовались площади под пиками полного поглощения с учетом фона, отнесенные к интервалу времени набора данных. Размерность этих характеристик — в отсчетах в секунду (cps). Следует отметить, что показатели фона слева и справа от пиков существенно отличаются как качественно, так и количественно. В качестве границ пиков по каналам слева и справа использовались те данные пиков, где соответствующие производные близки к нулю. Например, для данных, представленных на рис. 4, эти границы слева и справа находились, соответственно, в пределах 15 и 50 для ^{241}Am , а также 300 и 425 для ^{137}Cs .

Работая с кристаллами ВГО, нужно учитывать зависимость их световых выходов и времени высвечивания от температуры [9]. При этом необходимо различать два режима работы ГП: основной, когда защитный затвор открыт для длительной работы и установлено термическое равновесие при отводе тепла от блока детектирования в окружающую атмосферу, т. е. $T_{\text{bd}} - T_a \approx \text{const}$, где T_{bd} и T_a — соответственно температуры блока детектирования и окружающего воздуха, а также осуществлена температурная коррекция энергетических пиков, и сравнительно кратковременный переходной режим работы, когда T_{bd} растет, стремясь к равновесию без температурной коррекции положения пиков.

Начнем с основного режима работы ГП. Исследование его характеристик при разных температурах проводилось в ИФТП с использованием термокамеры, в которой температуры воздуха внутри регулировались от 10 до 35°C с отклонениями в пределах $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Характеристики гамма-плотномера зависят не только от температуры кристалла ВГО, но и от вещества внутри прибора, плотность которого также зависит от температуры. В идеальном случае температурные зависимости зарегистрированных интенсивностей для обоих изотопов было бы предпочтительнее приводить с полностью пустым гамма-плотномером, т. е. с вакуумом внутри него. Однако предварительные исследования с воздухом внутри ГП при избыточном давлении показали, что в этом случае чувствительность составляет около 150 cps/бар для обоих изотопов, что эквивалентно ~ 125 cps/(кг/м³). Изменение температуры от 10 до 35°C приводит к изменению плотности воздуха на $\sim 0,1$ кг/м³, что эквивалентно изменению интенсивности I примерно на 12–13 cps, что, как будет показано ниже, приблизительно в два раза меньше, чем предельная абсолютная погрешность этого варианта прибора. В связи с этим испытания гамма-плотномера в термокамере проводились с атмосферным воздухом внутри него. Кроме того, в этом случае обеспечивается естественная теплопередача в элементах гамма-плотномера.

Анализ влияния температуры окружающей среды T_a на характеристики пиков полного поглощения показывает, что изменение T_a от 10 до 35 °С сопровождается ростом амплитуды пика для ^{241}Am от $\sim 70\,000$ до $\sim 90\,000$ отсчетов с уменьшением полуширины спектральной линии. При этом правая граница для ^{241}Am соответствовала 54-му каналу ($B_{\text{Am}}(10^\circ\text{C}) = 54$), приходящемуся на малый пик спектра, который показан на рис. 4. С ростом T_a пик перемещался влево и занимал положение $B_{\text{Am}}(35^\circ\text{C})$, соответствующее 39-му каналу при примерно одинаковой ширине границ в 35 каналов в области фона. В свою очередь, для ^{137}Cs при таком же изменении T_a рост амплитуды пика происходил от $\sim 19\,100$ до $\sim 25\,300$ отсчетов также с уменьшением полуширины спектральной линии, а левая граница пика смещалась влево довольно существенно: от ~ 325 -го до ~ 225 -го канала при практически одинаковой ширине границ в 125 каналов. Как будет показано ниже (см. рис. 6), площади под пиками полного поглощения примерно одинаковы для ^{241}Am и ^{137}Cs при отношении размахов нижних границ около 3,6 (125/35) при примерно таком же отношении амплитуд ($70\,000/19\,100 \approx 3,7$). В этом случае для ^{241}Am влиянием положения границ пика в области фона на площадь под пиком можно пренебречь в первом приближении, причем соответствующие зависимости интенсивностей гамма-излучения от температуры были получены в дальнейшем с учетом фона в предположении постоянной ширины границ пиков в 35 каналов и при фиксированном положении правой границы B_{Am} , соответствующей 50-му каналу. Следует отметить, что характеристики фона зависят и от плотности вещества внутри гамма-плотномера.

Для ^{137}Cs форма пика изменяется с ростом $T_{\text{бд}}$ сложнее, сопровождаясь, как отмечалось, увеличением амплитуды и сужением полуширины спектральной линии, причем фон справа практически не регистрируется (см. рис. 4), тогда как слева он подрастает по мере увеличения температуры. В связи с этим была сделана коррекция положения левой границы B_{Cs} с учетом влияния фона между пиками при изменении температуры $T_{\text{бд}}$. Вид этой коррекции при фиксированной ширине между левой и правой границами пика, что подтверждается экспериментально, иллюстрируется рис. 5. В связи с тем, что положение левой границы B_{Cs} удобно выбирать перед началом работы с учетом температуры окружающей среды, корректирующая зависимость построена в виде $B_{\text{Cs}}(T_a)$, описываемом квадратичной параболой (6):

$$B_{\text{Cs}} = 342,75 - 0,982T_a - 0,07T_a^2. \quad (6)$$

С учетом сделанных допущений полученные результаты испытаний представлены на рис. 6, где каждая экспериментальная точка получена усреднением трех серий измерений (по 10 измерений в серии со временем набора данных в детекторе 60 с) при шести заданных температурах в термокамере. Из этого рисунка видно, что обе зависимости $I(T_{\text{бд}})$ представляют собой линейные функции с практически одинаковым наклоном — 59,5 и 60 cps/°С соответственно для ^{241}Am и ^{137}Cs с максимальным относительным отклонением экспериментальных точек от аппроксимирующих линий около $\pm 0,5\%$. В этом случае величины интенсивностей прошедшего излучения при некоторой конкретной температуре, например, $T_a = 20^\circ\text{C}$, при которой, вероятнее всего, проводится статическая калибровка ГП на двух или трех веществах в зависимости от решаемой задачи, могут определяться посредством соотношения (7):

$$I = \frac{I_m}{aT_{\text{бд}} + b}, \quad T_{\text{бд}} \approx T_a + 20^\circ\text{C}, \quad (7)$$

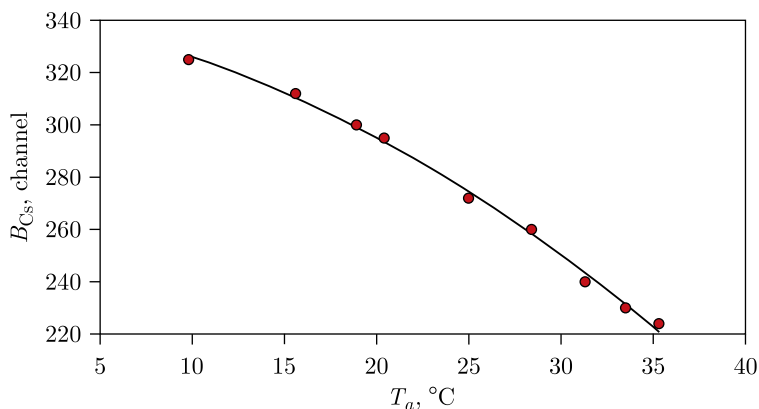


Рис. 5. Зависимость положения левой нижней границы B_{Cs} пика полного поглощения ^{137}Cs от температуры окружающей среды T_a

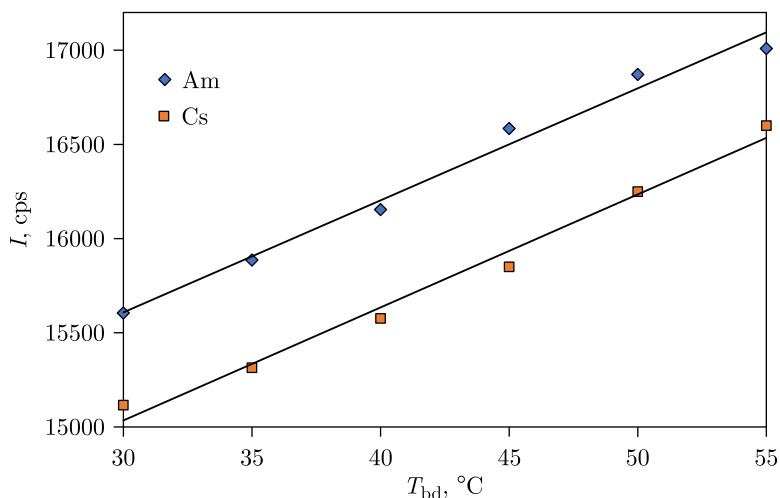


Рис. 6. Зависимости зарегистрированных интенсивностей гамма-излучения, I , от установившейся температуры блока детектирования, T_{bd} , для ^{241}Am и ^{137}Cs с воздухом внутри при атмосферном давлении и времени набора данных в детекторе 60 с

где I_m — измеренная величина интенсивности прошедшего излучения при текущей температуре блока детектирования; a и b — коэффициенты, определяемые из экспериментальных данных на рис. 6. В исследованном диапазоне температур между величинами T_{bd} и T_a экспериментально установлена практически постоянная разность температур $T_{bd} - T_a \approx 20^\circ\text{C}$. Значения коэффициентов в соотношении (7) составляют, соответственно, $a = 0,00367$ и $b = 0,853$ для ^{241}Am и $a = 0,00384$ и $b = 0,847$ для ^{137}Cs . То есть относительные температурные коэффициенты $a \approx 0,37\%/^\circ\text{C}$ и $a \approx 0,38\%/^\circ\text{C}$ для ^{241}Am и ^{137}Cs соответственно.

Если температурная компенсация с использованием соотношений (6) и (7) включена, то интенсивности регистрируемых излучений I_{Am} и I_{Cs} , приведенные к темпе-

ратуре $T_a = 20^\circ\text{C}$, практически постоянны при изменении температуры окружающей среды и, следовательно, температуры T_{bd} , и прибор реагирует только на состав вещества внутри него с максимальными относительными отклонениями $\delta I/I_{\max} \approx \pm 0,22\%$ на воздухе для обоих изотопов, что подтверждается дальнейшими экспериментами. Это очень важно для практического применения подобных устройств.

В переходном режиме, когда равенство $T_{bd} \approx T_a + 20^\circ\text{C}$ еще не достигнуто в соответствии с соотношением (7) и отмеченная температурная коррекция не введена, блок детектирования имеет особенность, которая выражается в том, что интенсивность прошедшего излучения для ^{241}Am подрастает со временем, как и ожидалось, из-за превалирования амплитуды в площади спектра под пиком по сравнению с уменьшением полуширины спектральной линии, тогда как для ^{137}Cs она снижается, стремясь к стационарным значениям. Это иллюстрирует рис. 7, где показана также динамика роста температуры блока детектирования $T_{bd}(t)$. Из рис. 7 видно, что стационарный или основной режим работы наступает примерно через 3 ч после открытия защитного затвора блока гамма-источников. Неожиданное на первый взгляд поведение характеристики $I_{Cs}(t)$ объясняется противоположным влиянием двух факторов, в соответствии с первым из которых интенсивность прошедшего излучения должна расти за счет увеличения амплитуды пика с повышением T_{bd} . Однако так как температурная коррекция не введена в этом случае, то при фиксированном положении левой границы происходит недоучет отсчетов левой части пика полного поглощения при росте $T_{bd}(t)$ и соответствующем перемещении этого пика влево (см. рис. 4). Поскольку количественный вклад второго фактора больше, чем первого, то результирующее влияние выражается в снижении характеристики $I_{Cs}(t)$, показанной на рис. 7, б. Переходные динамические процессы описываются квадратичными парабололами (8) для ^{241}Am и (9) для ^{137}Cs , а также логарифмической зависимостью (10) для $T_{bd}(t)$ с максимальными отклонениями $\delta T \approx \pm 0,1^\circ\text{C}$:

$$I_{Am} = 16053 + 0,861t - 0,0019t^2, \quad (8)$$

$$I_{Cs} = 15686 - 1,442t + 0,0030t^2, \quad (9)$$

$$T_{bd} = 36,6 + 0,6 \ln t. \quad (10)$$

Если не учитывать отмеченную особенность блока детектирования, то во время переходного периода можно получить ложные результаты, когда температурные зависимости $I(T_{bd})$ для ^{241}Am и ^{137}Cs будут иметь производные противоположных знаков.

При необходимости уменьшить статистическую ошибку определения компонентного состава потока в соответствии с (5) конструкция ГП, показанного на рис. 1, может быть оптимизирована за счет существенного сокращения расстояния между источником и детектором гамма-излучения, что позволяет увеличить количество фотонов в единицу времени на входе в детектор N^* примерно в 2–3 раза.

Что касается зависимостей амплитуд пиков полного поглощения от температуры T_a , то в первом приближении они описываются растущими квадратичными парабололами со значениями (в отсчетах) около 70 000 (15°C), 71 000 (20°C) и 79 000 (25°C) для ^{241}Am и 19 200 (15°C), 20 000 (20°C) и 22 000 (25°C) для ^{137}Cs . При этом отклонения от аппроксимирующих зависимостей заметно больше, чем для представленных на рис. 6 характеристик $I(T_{bd})$, которые и используются для решения поставленной задачи.

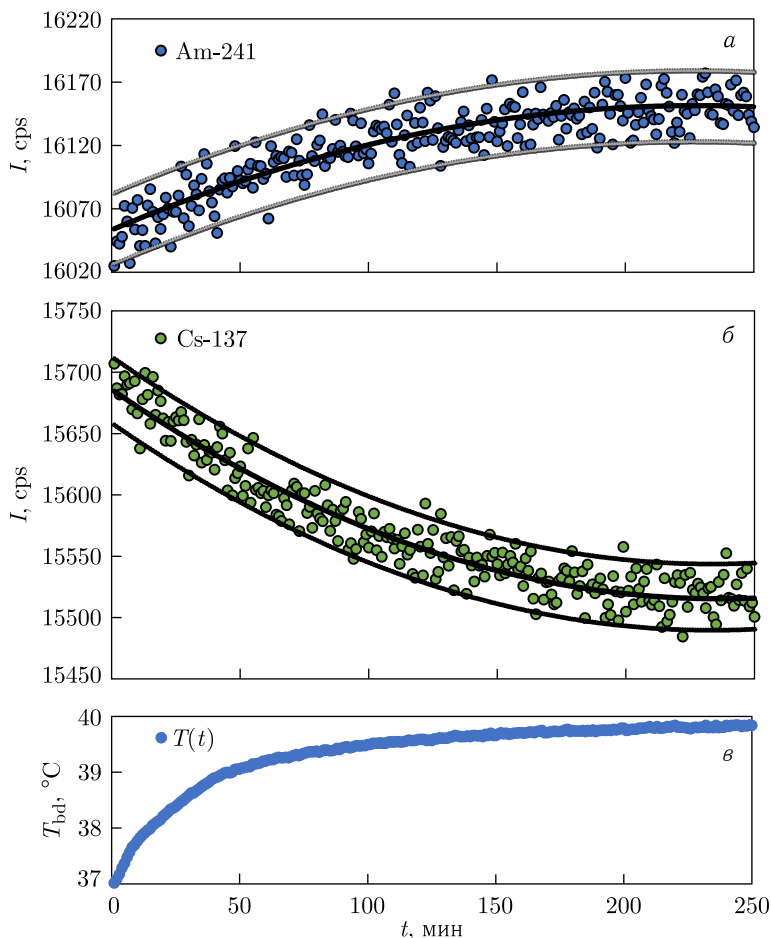


Рис. 7. Динамика зарегистрированных интенсивностей излучения I для ^{241}Am (а) и ^{137}Cs (б), а также температуры блока детектирования $T_{\text{бд}}$ (в) на воздухе при атмосферном давлении и температуре окружающей среды $T_a \approx 19^{\circ}\text{C}$; t — время

Из данных, представленных на рис. 7, можно также оценить относительную погрешность измерения интенсивностей $\delta I/I$, которая для атмосферного воздуха составляет $\sim \pm 0,17\%$ для обоих изотопов: (15525 ± 27) cps и (16150 ± 28) cps (средняя величина \pm стандартное отклонение). Отмеченные границы абсолютных отклонений от обобщающих зависимостей на рис. 7 получены для 95% экспериментальных точек. В представленных измерениях со временем набора данных в детекторе 60 с для каждой точки вкладом статистической погрешности можно пренебречь, поскольку при временах 60 и 300 с результаты практически одинаковы. Переход на более плотные вещества сопровождается некоторым повышением относительных погрешностей, которые, например, для эксоло D100 с плотностью $\sim 815,5 \text{ кг/м}^3$ (он применяется в качестве заменителя нефти на стенде ВНИИР (Казань) [7]) составляют $\delta I/I_{\text{Am}} = 0,24\%$ $((4240 \pm 10)$ cps) для ^{241}Am и $\delta I/I_{\text{Cs}} = 0,22\%$ $((9040 \pm 20)$ cps) для ^{137}Cs . Для воды эти погрешности могут подрастать до $\delta I/I \approx 0,32\%$.

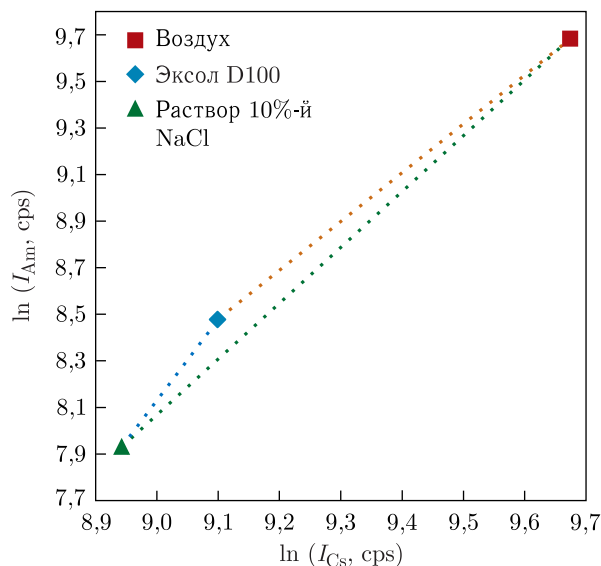


Рис. 8. Треугольник интенсивностей прошедшего излучения гамма-плотномера для трехфазных смесей воздух – эксол – соленая вода с исследованными изотопами ^{241}Am и ^{137}Cs

При анализе характеристик трехфазных смесей нефть–вода–газ практический интерес представляет так называемый треугольник компонентного состава, показанный на рис. 8. Поскольку зависимость интенсивности прошедшего через исследуемый поток излучения носит экспоненциальный характер в соответствии с выражением (1), то эту характеристику удобно представить в логарифмических координатах. С повышением давления в исследуемом потоке газовая точка перемещается в сторону меньших значений $\ln(I)$. Из рис. 8 видно, что треугольник интенсивностей прошедшего излучения гамма-плотномера сравнительно узок, и для успешного решения задачи определения компонентного состава трехфазных смесей желательно предпринимать дальнейшие усилия для достижения минимально возможных величин $\delta I/I$. Технические возможности определения компонентного состава зависят от способа обработки сигналов и качества исходных данных многофазного стенда, что требует дальнейших исследований с созданным гамма-плотномером.

ВЫВОДЫ

В созданном гамма-плотномере для диагностики трехфазных потоков нефть–вода–газ блок гамма-источников выполнен совмещенным (в одном корпусе) на базе изотопов ^{241}Am и ^{137}Cs , а блок детектирования гамма-квантов реализован на основе кристалла BGO диаметром и высотой 40 мм, отличающегося сравнительно высокой радиационной стойкостью, относительно высокой эффективностью регистрации гамма-излучения, а также негигроскопичностью. По сравнению с аналогом Vx фирмы Schlumberger [3], работающим с изотопом ^{133}Ba , созданный гамма-плотномер отличается гораздо большим ресурсом работы из-за существенной разницы периодов полураспада ^{133}Ba и ^{137}Cs (примерно в три раза).

Для достижения относительно высокой точности измерений в рамках решаемой задачи в качестве сигналов гамма-плотномера целесообразно использовать площади под пиками зарегистрированных излучений, отнесенные ко времени набора импульсов, а не амплитуды пиков поглощения. Сравнительно высокая стабильность измерения интенсивностей прошедшего исследуемый поток излучения для обоих изотопов обеспечивается разработанным методом температурной коррекции сигналов спектрометрического гамма-детектора с помощью линейного соотношения (7) с учетом сделанных допущений. Эта компенсация реализована программно в процессорной плате промышленного компьютера созданного макета бессепарационного трехфазного расходомера. При этом положение левой границы пика поглощения ^{137}Cs задается квадратичной зависимостью (6) от температуры окружающей среды или от температуры блока детектирования при фиксированной ширине каналов измерения с учетом фона между энергетическими пиками. При необходимости аналогичную процедуру можно использовать для изотопа ^{241}Am с целью повышения точности измерений. В пределах сделанных допущений для данного прибора коррекцию правой границы пика ^{241}Am можно не проводить.

Полученные относительные погрешности измеренных интенсивностей излучений для обоих изотопов $\delta I/I$ от $\sim 0,2$ до $\sim 0,35$ %, зависящие от плотности анализируемого вещества внутри гамма-плотномера, вполне достаточны для решения большинства задач в двухфазных потоках различного компонентного состава и некоторых задач в трехфазных потоках нефть–вода–газ. Для расширения диапазона применения гамма-плотномера в потоках нефть–вода–газ необходимо повышение точности измерений всеми доступными способами.

Благодарности. Авторы благодарят директора ИФТП А. А. Смирнова за высококвалифицированную помощь в создании спектрометрического гамма-детектора и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов Г. С.* Анализ метрологических характеристик установок для измерения расходных параметров продукции нефтяных скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2012. № 1. С. 5–14.
2. *Babelli I. M. M.* Development of Multiphase Meter Using Gamma Densitometer Concept // Intern. Nucl. Conf. Proc. 1997. P. 371–389.
3. *Аткинсон И. и др.* Многофазные расходомеры нового поколения, созданные фирмами Schlumberger и Framo Eng. AS // Сб. докл. 17-го Междунар. семинара по измерениям потоков в Северном море, Осло, 1999.
4. *Bukur D. B., Daly J. G., Patel S. A.* Application of γ -Ray Attenuation for Measurement of Gas Holdups and Flow Regime Transitions in Bubble Columns // Ind. Eng. Chem. Res. 1996. V. 35. P. 70–80.
5. *Filippov Yu. P., Filippov A. Yu.* Operation Features of a Narrowing Device in Separationless Three-Phase Flow-Meter // Flow Meas. Instrum. 2019. V. 68. P. 101578.
6. *Pan L.* High Pressure Three-Phase (Gas/Liquid/Liquid) Flow. PhD. Imperial College. London, 1996.

7. *Filippov Yu. P., Kakorin I. D., Kovrizhnykh A. M., Miklayev V. M.* Multiphase Flow-Meters for Superconducting Accelerators and Other Applications // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2017. V. 14, No. 4. P. 602–614.
8. ГОСТ Р 8.615-2005. ГСИ. Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования.
9. *Быстрицкий В. М., Зубарев Е. В., Красноперов А. В., Пороховой С. Ю., Рапацкий В. Л., Рогов Ю. Н., Садовский А. Б., Саламатин А. В., Салмин Р. А., Слепнев В. М., Андреев Е. А.* Гамма-детекторы в установках по обнаружению взрывчатых и наркотических веществ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2013. Т. 10, № 6. С. 925–935.
10. Блок детектирования БДГС-40.40. Опытный образец. Руководство по эксплуатации. Дубна: ИФТП, 2017.
11. «Prosoft» — продажа промышленных компьютеров. Каталог продукции ADVANTECH. www.prosoft.ru.

Получено 28 августа 2020 г.