

УДК 681.2.083

**СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ И ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ
В АППАРАТАХ ЯДЕРНО БЕЗОПАСНОГО ИСПОЛНЕНИЯ
ДЛЯ НОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

Денисевич А.А., Горюнов А.Г., Ливенцов С.Н., Сумин Г.В., Надеждин И.С. (НИ ТПУ, г. Томск)

e-mail: gvs9@tpu.ru

На территории Сибирского химического комбината реализуется проект «Прорыв», основная цель которого — создание замкнутого ядерного топливного цикла за счет строительства на территории комбината реактора и заводов по переработке и фабрикации ядерного топлива. Для соблюдения ядерной безопасности производства необходимо измерять уровень химических растворов в предназначенных для их хранения емкостях, но высокая радио- и химическая активность растворов ограничивает номенклатуру применяемых общепромышленных средств измерения. Используемые в настоящий момент средства измерения не лишены недостатков. К примеру, промышленные кондуктометрические уровнемеры, выполненные из специальных материалов, из-за особенностей своей работы вызывают химический гидролиз раствора и покрываются кристаллами, которые мешают проводить измерения. Эти уровнемеры, имея дискретную структуру, не могут выполнять непрерывные измерения. Также ограничение на применение уровнемеров накладывает геометрия аппаратов, обусловленная необходимостью соблюдения условий ядерной безопасности. Толщина слоя раствора ядерных делящихся материалов в таких аппаратах может составлять десятки миллиметров [1—3].

Измерение уровня и плотности растворов.

Чтобы определять технологические параметры процессов с необходимой точностью, требуется создать уровнемер, позволяющий измерять уровень растворов в емкостях непрерывно. При этом нужно учитывать высокую химическую и радиационную активность применяемых растворов и малую геометрию аппаратов. Плотность растворов также является важнейшим параметром, так как позволяет в условиях ограниченной

возможности отбора и анализа проб определять концентрацию ядерных материалов в водных и органических растворах, чистой азотной кислоте, щелочи, органике и пр. Создание прибора, совмещающего функции измерения уровня и плотности растворов, позволит существенно повысить безопасность производства и снизить материальные затраты на закупку оборудования [4, 5].

Для измерения уровня и плотности растворов предлагается использовать пьезометрический метод, основанный на пропускании через слой жидкости газа с помощью погруженного в емкость специального щупа. Используя датчик дифференциального давления, можно измерить давление газа в щупе относительно атмосферного давления или давления газа над слоем жидкости, если емкость герметична. Этот метод можно применять и для измерения плотности жидкости [6].

В рассматриваемом случае после пропускания газа через слой жидкости перепад (разность) давления между измерительными трубками второго и третьего щупов равен

$$\Delta P_1 = \rho g \Delta h, \quad (1)$$

где ρ — плотность раствора, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; Δh — расстояние между измерительными трубками второго и третьего щупов высотой $h_{щ1}$ и $h_{щ2}$ соответственно, м.

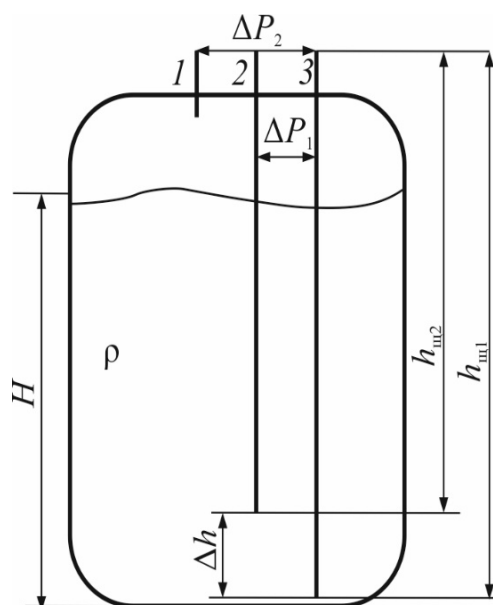
Из выражения (1) можно вычислить плотность раствора по формуле

$$\rho = \frac{\Delta P_1}{g \Delta h}. \quad (2)$$

Перепад давления между трубками первого и третьего щупов равен

$$\Delta P_2 = \rho g H, \quad (3)$$

где H — уровень жидкости в емкости, м (рис. 1).



Р и с. 1. Схема измерения уровня и плотности в замкнутой емкости: 1—3 — номера измерительных шупов

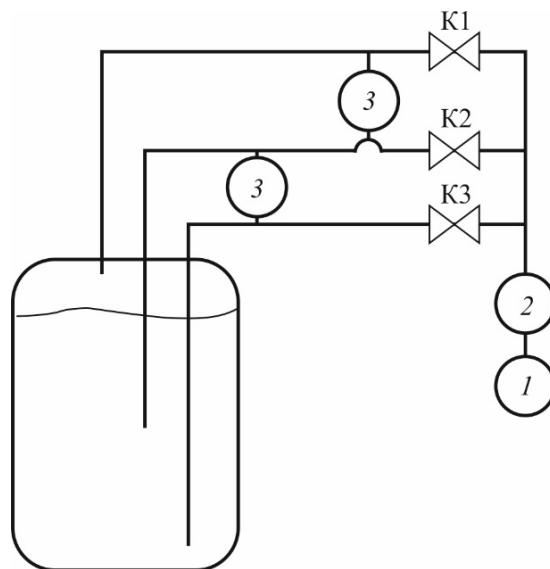
Используя значения, полученные по формулам (1) и (3), можно определить уровень жидкости по выражению $H = (\Delta P_2 / \Delta P_1) \Delta h$.

При отсутствии подачи воздуха уровень воды в трубках второго и третьего шупов равен уровню в резервуаре. Для проведения измерения в трубку на определенный короткий промежуток времени, то есть импульсно, подается сжатый воздух из компрессора. Регулятор расхода газа ограничивает подачу воздуха в емкость. Датчики дифференциального давления измеряют разность давления воздуха в трубках. Ограничение подачи воздуха через трубки происходит с помощью соленоидных (электромагнитных) клапанов. При открытии клапанов K2 и K3 сжатый воздух поступает через капилляры, погруженные в жидкость. Зная разность длины капилляров и перепад давления между ними, можно определить плотность исследуемого раствора, используя выражение (2). При открытии клапанов K1 и K3 сжатый воздух проходит через капилляр большей длины. Так как вывод шупа с клапаном K1 сообщается с атмосферой внутри емкости, зная перепад давления и плотность жидкости при открытии клапанов K1 и K3, можно вычислить уровень жидкости в емкости. При применении схемы измерения уровня

и плотности жидкости с разделительной воздушной средой (рис. 2) давление воздуха, создаваемое компрессором, необходимо, используя редуктор, ограничить максимальным значением $P_{\max}$, которое рассчитывают по формуле

$$P_{\max} = 1,1 \rho_{\max} g h_{\max},$$

где $\rho_{\max}$ — максимально возможная плотность раствора, кг/м³; $h_{\max}$ — высота емкости, м.



Р и с. 2. Схема измерения уровня и плотности жидкости с разделительной воздушной средой: 1 — компрессор; 2 — регулятор расхода газа; 3 — датчики дифференциального давления; K1—K3 — электромагнитные клапаны

Схема измерения уровня и плотности жидкости с разделительной воздушной средой неприменима в полностью герметичных емкостях, так как избыточное давление воздуха может деформировать корпус и привести к утечке. Но на предприятиях ядерного топливного цикла эта проблема не возникает, так как все емкости подключены к системе газосудвки для создания разрежения над слоем жидкости. Следовательно, подаваемый газ уходит в систему газосудвки и давление внутри емкости не повышается. Если применять данную схему в замкнутых емкостях, находящихся под давлением, система измерения самостоятельно учитывает давление (избыточное или разреженное) в емкости с помощью первого шупа (см. рис. 1), подключенного к одной из камер датчика дифференциального давления, что снимает огра-

ничения на величину разряжения или избыточного давления в аппарате. Если аппарат содержит в своей структуре контур стабилизации давления, то система измерения при корректных настройках регулятора не повлияет на работу аппарата. Однако при отсутствии контура регулирования и полностью герметичной емкости система измерения будет увеличивать давление в емкости до тех пор, пока оно не будет равным давлению в ресивере компрессора.

Проверка метода измерения. Для проверки был создан лабораторный стенд, состоящий из бака, шупа и датчика давления ДМ5017 (диапазон измерения до 25 кПа, приведенная неопределенность прибора 0,25%). Применение конкретного датчика давления обусловлено его отличительной особенностью — наличием модуля реализации дополнительных функций в виде дискретных выходов релейного типа, что упрощает управление системой клапанов.

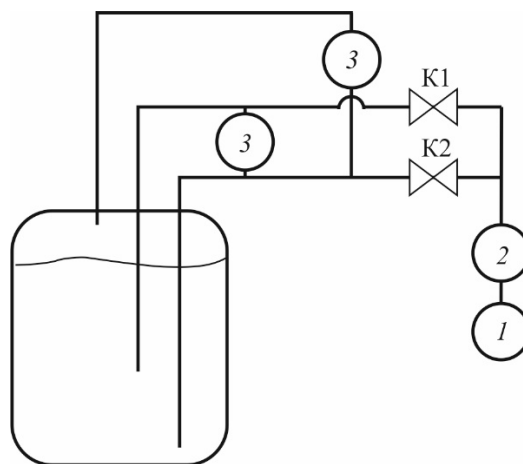
В экспериментах были использованы водные растворы поваренной соли, в которых ее массовая концентрация варьировалась от 0 до 270 г/л, что соответствует изменению плотности от 998,2 до 1174 кг/м³. Для оценки точности проведенных в каждом эксперименте измерений были учтены три вида неопределенности: 1) δ — относительная, 2) γ — приведенная к диапазону измерений, 3) $\langle \delta \rangle$ — среднее значение отклонений от эталона. В качестве эталона для плотности использовали значение, измеренное с помощью лабораторного ареометра (табл. 1).

Таблица 1. Результаты экспериментов по проверке метода измерения

Плотность раствора, кг/м ³	Неопределенность измерения, %					
	плотности			уровня		
	δ	γ	$\langle \delta \rangle$	δ	γ	$\langle \delta \rangle$
988,2	3,48	1,74	2,05	3,58	1,19	2,11
1065	3,25	1,73	1,56	3,53	1,18	2,06
1174	2,92	1,71	1,21	3,04	1,01	1,99

Применение данного метода также возможно при использовании жидкости в качестве разделительной среды, если появление пузырьков газа может привести к нарушению технологического

процесса (например, при измерении уровня границы раздела фаз в экстракционных колоннах [7, 8]). Конструкция измерительного шупа, используемая в системе измерения уровня и плотности жидкости с разделительной жидкой средой (рис. 3), не изменится (см. рис. 1).



Р и с. 3. Схема измерения уровня и плотности жидкости с разделительной жидкой средой: 1 — емкость с разделительной жидкостью; 2 — насос; 3 — датчики дифференциального давления; K1 и K2 — электромагнитные клапаны

После пропускания разделительной жидкости через шуп, погруженный в нее, перепад давления равен

$$\Delta P_1 = (\rho - \rho_{РЖ})g\Delta h, \quad (4)$$

где $\rho_{РЖ}$ — плотность разделительной жидкости, кг/м³.

Зная ΔP_1 из выражения (4), можно вычислить плотность по формуле

$$\rho = (\Delta P_1 / g\Delta h) + \rho_{РЖ}. \quad (5)$$

Перепад давления ΔP_2 равен

$$\Delta P_2 = (\rho g H + P_{атм} - \rho_{РЖ} g h_1) - P_{атм}, \quad (6)$$

где h_1 — длина шупа, погруженного в раствор, м; $P_{атм}$ — давление над слоем жидкости в емкости, Па.

Используя ρ и ΔP_2 из выражений (5) и (6), можно определить уровень жидкости в емкости:

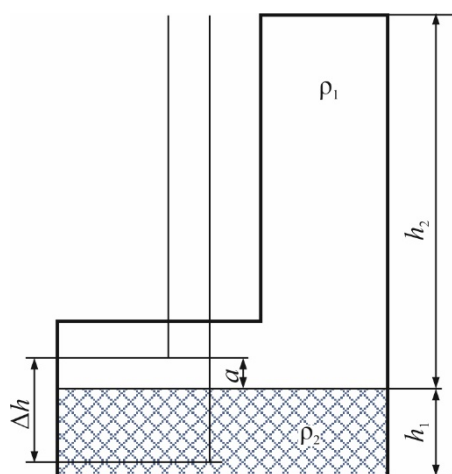
$$H = \frac{(\Delta P_2 + \rho_{РЖ} g h_1) \Delta h}{\Delta P_1 + \rho_{РЖ} g \Delta h}. \quad (7)$$

Рассмотрим измерение уровня границы раздела водной и органической фаз в экстракционной колонне. Шуп системы, выполненный из стойкого материала, может быть расположен в проходке

колонны, измерительная часть шупа может располагаться в чистой зоне (рис. 4). Перепад давления между трубками равен

$$\begin{aligned} \Delta P &= (\rho_1 g h_2 + \rho_2 g h_1) - \\ &- (\rho_1 g h_2 + \rho_2 g a) - \rho_{РЖ} g \Delta h = \\ &= \rho_2 g h_1 - \rho_1 g a - \rho_{РЖ} g \Delta h, \end{aligned} \quad (8)$$

где ΔP — перепад давления между трубками шупов, измеряемый системой, Па; ρ_1, ρ_2 — плотность органической и водной фазы соответственно, кг/м³; h_1 — длина шупа, не погруженного в раствор, м.



Р и с. 4. Схема измерения границы раздела фаз в экстракционной колонне

Расстояние между измерительными трубками шупов равно

$$\Delta h = h_1 + a. \quad (9)$$

Выразив a и подставив его в уравнение (8), получим

$$\begin{aligned} \Delta P &= \rho_2 g h_1 + \rho_1 g (\Delta h - h_1) - \rho_{РЖ} g \Delta h = \\ &= \rho_2 g h_1 + \rho_1 g \Delta h - \rho_1 g h_1 - \rho_{РЖ} g \Delta h. \end{aligned} \quad (10)$$

Следовательно, h_1 , равная уровню водной фазы, будет определена как

$$h_1 = \frac{\Delta P_1 - \rho_1 g \Delta h + \rho_{РЖ} g \Delta h}{(\rho_2 - \rho_1) g}. \quad (11)$$

Проверка работоспособности метода измерения. Для проверки экспериментальный стенд был изменен согласно схеме, представленной на рис. 3. В эксперименте использовали жидкости с существенно отличающейся плотностью. В качестве имитатора водной фазы применяли глицерин

плотностью 1250 кг/м³, органической фазы — масло плотностью 920 кг/м³. Регистрацию перепада давления также осуществляли с помощью датчика ДМ5017. Расстояние между измерительными трубками шупов составило 0,3 м, в качестве разделительной жидкости выступала вода плотностью 998 кг/м³ (табл. 2). Для оценки точности проведенных в каждом эксперименте измерений были использованы два вида неопределенности: 1) δ — относительное отклонение от эталона в худшем случае, 2) $\langle \delta \rangle$ — среднее отклонение от эталона.

Т а б л и ц а 2. Результаты экспериментов для проверки работоспособности метода

Давление, кПа	Уровень, см		Неопределенность, %	
	измеренный	фактический	δ	$\langle \delta \rangle$
0,114	10,6	11,3	6,8	6,6
0,175	12,5	13,1	5,2	4,8
0,139	11,4	12,0	5,5	5,2
0,486	22,1	22,7	3,1	2,7
0,039	8,3	8,6	3,9	3,6
0,272	15,5	15,7	2,1	1,3
0,078	9,5	9,9	4,5	4,2

Закключение. Применение гидростатических уровнемеров-плотномеров с разделительной воздушной средой в технологических емкостях в условиях производства по переработке отработавшего ядерного топлива имеет такие преимущества, как:

контроль проведения технологических операций в емкости по изменению плотности растворов (перемешивание, добавление реагентов и пр.) и разрежения или давления в емкости (прием, выдача);

создание в одном измерительном шкафе уровнемера-плотномера узла с полным технологическим контролем над емкостью при подключении к контроллеру:

термосопротивления (термоэлектрического преобразователя) для контроля температуры с последующим расчетом поправок на приведение концентрации и объема к нормальным условиям,

нижнего, среднего (при необходимости), верхнего и аварийного сигнализаторов для ре-

зервного контроля и сигнализации технологических операций,

погружных кондуктометров, р(Н)-метров и других контрольно-измерительных приборов и автоматики при необходимости;

размещение контрольно-измерительных приборов и автоматики вдали от загрязненной зоны, что облегчает возможность проведения операций технического обслуживания и ремонта, а также исключает непосредственный контакт с радиоактивными веществами;

выполнение дополнительного барботажа (перемешивания) раствора в емкости, где это допустимо;

встраивание трубок зонда непосредственно в конструкцию емкостей.

Общие недостатки гидростатических уровней-плотномеров с разделительной воздушной средой заключаются в наличии протяженных линий (трубок), требующих дополнительных вентилей или обратных клапанов для предотвращения обратного перетока раствора при давлении из емкости, а также в сложности поддержания герметичности линий при обслуживании, ремонте и поверке оборудования из-за многочисленных соединений.

Исследование выполнено в рамках федерального проекта «Передовые инженерные школы» (научный проект ПИШ-НИР-2023-005 «Разработка и внедрение алгоритмов и систем автоматизированного управления технологическими процессами»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chursin Y.A., Gozhimov A.I., Liventsov S.N., Shmidt O.V. Operating mode optimisation of displacing ionexchanging chromatographic columns cascade. — Chemical Engineering Transactions (CET), 2017, v. 61, p. 391—396.
2. Pletnev A.O., Goryunov A.G., Liventsov S.N. e. a. Control system of storage containers filling in the uranyl nitrate crystallization process in a linear crystallizer. — Ibid, 2018, v. 70, p. 1429—1434.
3. Nadezhdin I.S., Gozhimov A.I., Goryunov A.G. e. a. Crystallizer performance research when solution level changing. — Heliyon, 2019, v. 5, is. 5, № e01693, 12 p.
4. Патент 2010114351, Российская Федерация [Электронный ресурс]. Устройство для измерения уровня или плотности жидкости / Гофман Ф.Э. Официальный сайт ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности». Режим доступа: в открытом доступе. URL: <https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?facesredirect=true&id=edefa3dde030fb1eb9bbda8a6dbf3dd6> (дата обращения 12.10.2023).
5. Гофман Ф.Э., Гофман Р.Д., Зильберман Б.Я. и др. Лабораторный выпарной стенд с автоматизированной системой управления. — Химическая технология, 2012, т. 13, № 9, с. 565—570.
6. Nadezhdin I.S., Goryunov A.G., Svinolupov Y.G., Zadorozhnaya O.J. Study of the metrological characteristics of the hydrostatic pressure sensor. — Sensor Review, 2019, v. 39, p. 665—669.
7. Горюнов А.Г., Дядик В.Ф., Ливенцов С.Н., Чурсин Ю.А. Математическое моделирование технологических процессов водно-экстракционной переработки ядерного топлива. Томск: ТПУ, 2011, 236 с.
8. Nadezhdin I.S., Zelenetskaya E.P., Goryunov A.G. e. a. Modelling of the monitoring and control system of extraction units with nuclear-safe tanks via use of capillary impulse lines with differential low-pressure gages. — Chemical Engineering Transactions (CET), 2018, v. 70, p. 1405—1410.

Поступила в Редакцию 09.10.23

УДК 004.942

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НА БАЗЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКИХ СРЕД НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Емельянов А.М., Надеждин И.С., Ливенцов С.Н. (НИ ТПУ, г. Томск)

e-mail: kun9@tpu.ru

В настоящее время многие технологические процессы в различных отраслях промышленности связаны с транспортированием жидкости по тру-

бопроводам. Важнейшим условием эффективности таких процессов является наличие достоверной информации об их основных технологических