

УДК 681.2.083

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МАЛОГО РАСХОДА АГРЕССИВНЫХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЖИДКОСТЕЙ РАДИОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Денисевич А.А., Горюнов А.Г., Ливенцов С.Н., Сумин Г.В., Надеждин И.С. (НИ ТПУ, г. Томск)
e-mail: gvs9@tpu.ru

При переработке отработавшего ядерного топлива поддержание точно заданного расхода жидкости необходимо для обеспечения ядерной безопасности и оптимального протекания технологических процессов, в особенности в центробежных экстракторах, используемых для извлечения целевых компонентов. Для технологических растворов радиохимического производства характерны высокая агрессивность и радиоактивность, что предъявляет дополнительные требования к средствам КИПиА, такие, как стойкость материалов, устойчивость к ионизирующему излучению и др., а также повышает затраты на обслуживание и ремонт приборов [1]. Применяемые в настоящее время на радиохимических предприятиях приборы способны обеспечивать высокую точность измерения в течение короткого срока, так как теряют свои свойства под воздействием измеряемой среды. Таким образом, определение малого расхода жидкостей обеспечит необходимую точность измерения и продолжительный срок эксплуатации.

В настоящее время на радиохимическом производстве малый расход дозируется перистальтическими насосами, однако удовлетворительные результаты могут быть достигнуты только в лабораторных условиях при кратковременных экспериментах. При промышленном использовании в круглосуточном режиме в результате длительного механического и химического воздействия гибкий шланг насоса, изготовленный из химически стойких полимеров, упруго деформируется, поэтому расход значительно изменяется, что не позволяет применять перистальтические насосы для точного дозирования [2].

Существенное повышение точности без отказа от дорогостоящих перистальтических насосов возможно посредством автоматизированной системы стабилизации расхода с обратной связью. В этом случае необходимы контроль расхода с высокой точностью и программно-аппаратное управление насосом для автоматизированной системы контроля и управления.

Целью настоящей работы является повышение точности дозирования растворов в технологических процессах посредством измерения их расхода.

В настоящее время есть множество приборов измерения расхода жидких сред, основанных на разных принципах действия: тахометрические, постоянного и переменного перепада давления, ультразвуковые, кориолисовы и др. В связи с особенностями измеряемой среды они позволяют определять расход до 7 л/ч с требуемой точностью в течение короткого промежутка времени. Известные расходомеры LFM-R (Германия), кориолисовы расходомеры серии mini CORI-FLOW и расходомеры серии LF (Нидерланды) определяют малый расход, но их нельзя использовать для контроля радиоактивных жидкостей из-за невозможности отделения электронной измерительной части от первичного преобразователя и установки за пределами горячих камер. Кроме того, некоторые элементы этих расходомеров подвержены разрушению и снижению заявленной точности под воздействием ионизирующего излучения.

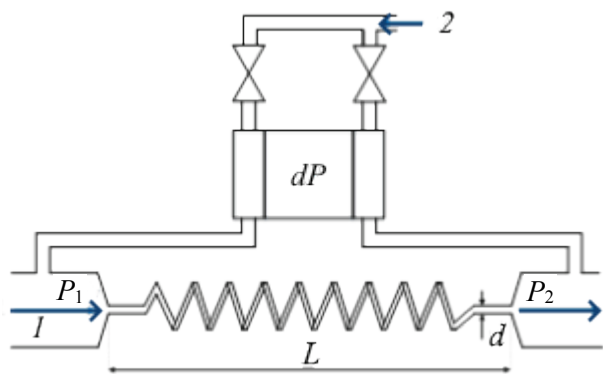
Малый расход можно измерять капиллярными расходомерами — подтип расходомеров с гидравлическим сопротивлением [3]. Первичным преобразователем такого прибора служит капиллярная трубка известной длины. Объемный расход раствора определяется по перепаду давления на капиллярной трубке по закону Пуазейля

$$Q = \frac{\pi d^4 (P_1 - P_2)}{128 \eta L},$$

где d — внутренний диаметр капилляра, м; P_1 , P_2 — давление до и после капиллярного расходомера соответственно, Па; η — вязкость жидкости, Па·с; L — длина капилляра, м.

В настоящей работе для измерения малого расхода предлагается использовать схему, показанную на рис. 1.

Для контроля расхода технологических растворов радиохимического производства в диапазоне до 10 л/ч предложено применять капилляр-



Р и с. 1. Схема измерения малого расхода жидкости с использованием капиллярного расходомера: 1 — движение рабочего раствора; 2 — разделительная жидкость

ный расходомер длиной 2—3 м и внутренним диаметром капилляра 2 мм. Для уменьшения габаритных размеров капилляр выполняется в виде спирали, намотанной на жесткий металлический каркас. Создаваемый им перепад давления передается через разделительную жидкость по импульсным каналам на датчик дифференциального давления [4, 5]. Соединительные капилляры, через которые подключается датчик дифференциального давления, отделяют прибор от измеряемого радиоактивного раствора. Соединительные капилляры заполнены жидкостью, которая периодически прокачивается через сенсорный блок датчика дифференциального давления по направлению к измерительному капилляру.

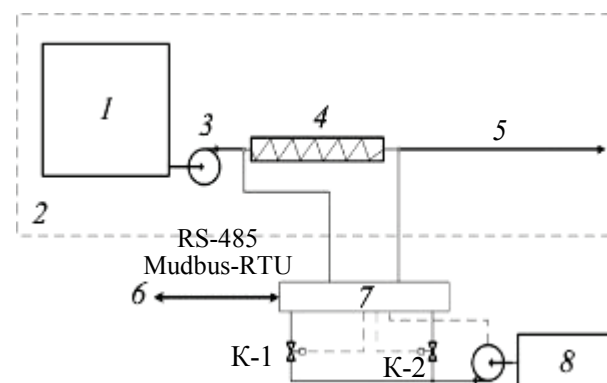
Разделительная жидкость дозируется периодически, чтобы не вносить погрешность в измерения. При прокачке измерения не проводятся. В нормальных режимах работы подача разделительной жидкости осуществляется в автоматическом режиме с помощью насоса и электрических клапанов. Экспериментально установлено, что для подводящих капилляров длиной до 10 м — фторполимерной трубки внутренним диаметром 2 мм достаточно подавать разделительную жидкость 1 раз в 8—12 ч длительностью 1—2 с, что не влияет на технологический процесс. При этом измеряется давление разделительной жидкости, что позволяет контролировать целостность капилляра и определять степень его загрязнения.

В качестве разделительной жидкости для минимизации влияния на контролируемый процесс можно применять дистиллированную воду, чистую среду или растворитель. Разделительная жидкость позволяет располагать датчик давле-

ния вне зоны воздействия ионизирующего излучения, что приводит к увеличению его срока службы, а также дает возможность обслуживать измерительную часть системы (см. рис. 1).

В качестве измерителя дифференциального давления может быть использован датчик ДМ5017. Его электронный модуль содержит четыре электромагнитных реле, с помощью которых можно управлять электромагнитными клапанами и насосом для дозирования разделительной жидкости. Периодическое дозирование необходимо для исключения воздействия радиации на датчик давления в результате диффузии находящихся в контролируемом растворе радиоактивных продуктов деления в разделительную жидкость по соединительным капиллярам. Возникающие пузырьки воздуха не влияют на измерения, если не приводят к разрыву струи в импульсной линии. При использовании в качестве импульсной линии трубок внутренним диаметром более 4 мм разрыв струи из-за влияния пузырьков воздуха маловероятен. Измерительный и соединительные капилляры, соединительные фитинги выполнены из фторполимерного материала, который обладает высокой стойкостью к воздействию агрессивных сред и ионизирующего излучения.

В лабораторных испытаниях контролируется расход жидкости при ее дозировании из исходной емкости. Для этого измерительный капилляр установлен в отдельной зоне, имитирующей горячую камеру, датчик дифференциального давления и емкость с разделительной жидкостью — в условно чистой зоне (рис. 2) [6].



Р и с. 2. Структурная схема системы измерения малого расхода жидкости: 1 — емкость с измеряемой жидкостью; 2 — горячая камера; 3 — перистальтический насос; 4 — измерительный капилляр; 5 — в каскад центробежных экстракторов; 6 — емкость с разделительной жидкостью; 7 — датчик дифференциального давления; 8 — АСУ ТП

На первом этапе испытаний была проведена градуировка системы измерения расхода жидкости. В качестве разделительной жидкости использована дистиллированная вода, так как ее небольшое количество в контролируемом растворе не приведет к изменению технологического процесса. Для этого задавали стабильный расход раствора с помощью перистальтического насоса и определяли перепад давления на измерительном капилляре. Заданный расход определяли с помощью расходомера Кориолиса серии mini CORI-FLOW модификации M13 с максимальным диапазоном измерения 2 л/ч и погрешностью 0,2%. Усредненная градуировочная характеристика, показанная на рис. 3, аппроксимирована полиномом второго порядка:

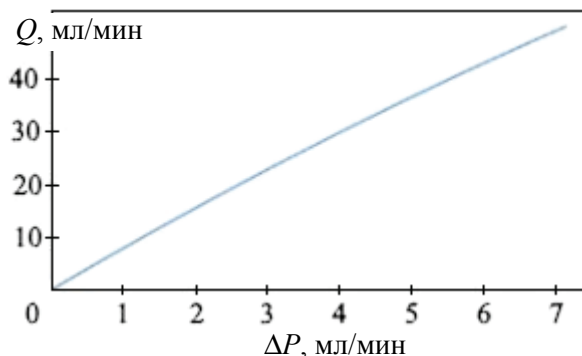
$$Q = -0,1464\Delta P^2 + 8,0175\Delta P + 0,1072, \quad (1)$$

где ΔP — перепад давления на измерительном капилляре, кПа.

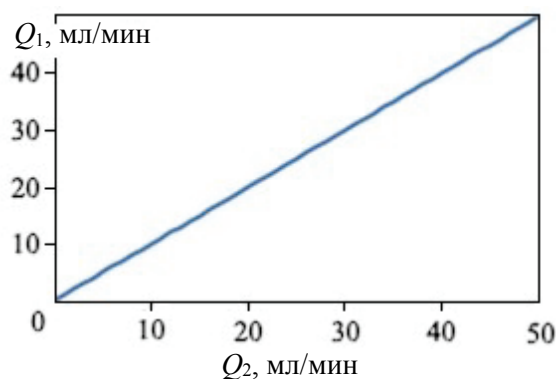
При аппроксимации использовался метод наименьших квадратов, погрешность при аппроксимации полиномом второго порядка составила 0,93%, третьей степени и выше — более 1,5%.

Зависимость (1) была записана в памяти датчика дифференциального давления для автоматического преобразования перепада давления на измерительном капилляре в расход.

На втором этапе исследований измеряли расход при произвольно заданном расходе перистальтического насоса. Приведенная погрешность измерения при изменении расхода водной фазы в интервале 0—50 мл/мин составила менее 1%, как это показано на рис. 4. При непрерывной эксплуатации в течение двух недель максимальная приведенная погрешность измерения повысилась до 5%. Увеличение погреш-



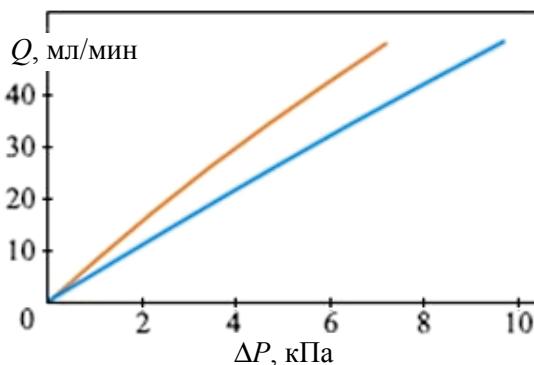
Р и с. 3. Усредненная градуировочная характеристика системы измерения малого расхода жидкости



Р и с. 4. Эталонный и измеренный в интервале до 50 мл/мин расход дистиллированной воды

ности обусловлено изменением температуры окружающей среды.

Для снижения погрешности измерения, вызываемой изменением таких характеристик контролируемых растворов, как плотность и вязкость, в лабораторных условиях были определены градуировочные характеристики системы измерения при разной плотности измеряемой жидкости и установлено существенное влияние на ее расход вязкости (рис. 5). При измерении перепада давления при разном расходе дистиллированной воды температурой 14 и 20 °С было установлено, что при повышении температуры ее вязкость уменьшается, расход при этом увеличивается. Влияние вязкости на расход можно определить путем введения коэффициента полинома (1) перед старшей степенью полинома второй степени, который получен в результате аппроксимации экспериментальных данных зависимости расхода измеряемой жидкости от перепада давления на концах капилляра. Таким образом можно корректировать расход при изменении температуры и повысить точность измерения. Определение текущих показаний вязкости возможно путем измерения плотности



Р и с. 5. Зависимость перепада давления и расхода дистиллированной воды от температуры 20 (—) и 14 °С (—)

раствора и дальнейшего пересчета текущих показаний плотности в показания вязкости, так как при работе оборудования радиохимических производств именно концентрация (плотность) оказывает существенное влияние на вязкость.

Система была испытана в лабораторных испытаниях с условиями, приближенными к производственным. Средняя относительная погрешность измерения расхода азотной кислоты разной концентрации с дистиллированной водой в качестве разделительной среды составила 3,7% в диапазоне 1—50 мл/мин [7].

Разработанная система позволяет измерять малый расход радиоактивных растворов с достаточной точностью и исключением радиоактивного загрязнения прибора в условиях, когда применение других приборов невозможно [8]. При ее использовании можно автоматически дозировать требуемые растворы с заданной точностью, что повысит эффективность ведения технологических процессов путем создания на основе разработанного расходомера систем автоматического дозирования с применением пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора. Система может применяться в медицинских целях, в том числе в радиофармакологии для точного дозирования препаратов, а также в других отраслях, где необходимо контролировать расход жидкости, не превышающий 50 мл/мин.

Исследование выполнено в рамках федерального проекта «Передовые инженерные

школы», научный проект «Разработка и внедрение алгоритмов и систем автоматизированного управления технологическими процессами», ПИШ-НИР—2023-005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shadrin A.Y., Ivanov V.B., Skupov M.V. et al. Comparison of closed nuclear fuel cycle technologies. — Atomic Energy, 2016, v. 121, № 2, p. 119—126.
2. Pletnev A.O., Denisevich A.A., Goryunov A.G., Manenti F. Development the device of automatic dispensing low flowrates of aggressive and radioactive liquids. — Chem. Engng Transact., 2018, v. 70, p. 1411—1416. DOI: 10.3303/CET1870236.
3. Солодовников В.В. Измерительные устройства, преобразующие элементы и устройства. М.: Машиностроение, 1973. 671 с.
4. Бирюков Б.В., Данилов М.А., Кивилис С.С. Точные измерения расхода жидкостей. М.: Машиностроение, 1977. 144 с.
5. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Справочник. Л.: Машиностроение, 1989. 701 с.
6. Мановян А.К., Хачатурова Д.А., Лозин В.В. Лабораторная перегонка и ректификация нефтяных смесей. Учебное пос. М.: Химия, 1984. 239 с.
7. Радкевич Я.М., Схиртладзе А.Г., Лактионов Б.И. Метрология, стандартизация и сертификация. М.: Высшая школа, 2007. 791 с.
8. Сумин Г.В., Денисевич А.А., Горюнов А.Г., Ливенцов С.Н. Разработка системы измерения малых расходов радиоактивных жидкостей радиохимических производств. — Изв. вузов. Физика, 2021, т. 64, № 2-2, с. 106—112.

Поступила в Редакцию 06.10.23

УДК 621.039.342

РАСЧЕТ КАСКАДА С ОДИНАКОВЫМ ЧИСЛОМ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ В СТУПЕНЯХ И ЗАДАННОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЦЕЛЕВОГО ИЗОТОПА В ВЫХОДЯЩИХ ПОТОКАХ

Палкин В.А. (Уральский федеральный ун-т, г. Екатеринбург)

e-mail: profp2004@mail.ru

Стабильные изотопы на практике разделяют, как правило, в каскадах с одинаковым числом газовых центрифуг в ступенях. Расчетную схему обычно сводят к прямоугольному каскаду с одинаковыми потоками питания и коэффициентами разделения ступеней. В расчетах задаются параметры исходной изотопной смеси, отношение выходящих потоков, число ступеней и точка подачи питания каскада. Выходными характеристиками являются внутренние парамет-

ры каскада и концентрация изотопов во внешних потоках [1—4].

Целью настоящей работы является разработка метода расчета каскада с одинаковым числом газовых центрифуг в ступенях и заданной концентрацией целевого изотопа в выходящих потоках. Основу метода составляют алгоритмы, учитывающие зависимость коэффициентов разделения газовых центрифуг от потока питания и коэффициента деления потока. Рас-