

Научная статья

УДК 66.071.6.081.6

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-37-46

О реализации динамического режима сорбции на селективно проницаемых микросферах для выделения гелия

**Иван Викторович Казанин, Елизавета Павловна Щиглова
Даниэла Владимировна Журавлева**

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия
kazanin@itam.nsc.ru

Аннотация

Работа посвящена предварительным исследованиям мембранно-сорбционного метода разделения газов в динамическом режиме. Для исследования и анализа данного режима газоразделения необходимо создание специального экспериментального стенда и измерительного оборудования, позволяющего непосредственно в темпе эксперимента получать информацию об изменении концентрации компонент в газовой смеси. Для измерения концентрации в ходе эксперимента был использован разработанный в ИТПМ СО РАН датчик концентрации для бинарных смесей газов на основе термоанемометрического метода. Проведено тестирования датчика концентрации, получены тарировочные зависимости для воздушно-гелиевой смеси, отработана методика по измерению концентрации компонент в газовой смеси непосредственно в темпе проведения эксперимента. Определены параметры отклика датчика на ступенчатое изменение концентрации гелия в смеси, время реакции составило менее 0,4 секунды. Проведены эксперименты по моделированию динамического режима сорбции при течении гелийсодержащей смеси по селективно проницаемому слою из кремнеземных микросфер. По результатам экспериментов даны рекомендации по подготовке стенда для динамического разделения газов на основе мембранно-сорбционного метода.

Ключевые слова

гелий, микросферы, селективность, динамический режим сорбции, газоразделение

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области (код проекта 23-29-10068).

Для цитирования

Казанин И. В., Щиглова Е. П., Журавлева Д. В. О реализации динамического режима сорбции на селективно проницаемых микросферах для выделения гелия // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 1. С. 37–46. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-37-46

On the Implementation of a Dynamic Sorption Mode on Selectively Permeable Microspheres for Helium Recovery

Ivan V. Kazanin¹, Elizaveta P. Shchiglova,
Daniela V. Zhuravleva

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

kazanin@itam.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6865-3142>

Abstract

The work is devoted to preliminary studies of the membrane-sorption method of gas separation in the dynamic mode. To study and analyze this gas separation mode, it is necessary to create a special experimental stand and measuring equipment that allows obtaining information on changes in the concentration of components in the gas mixture directly during the experiment. To measure the concentration during the experiment, a concentration sensor for binary gas mixtures developed at ITAM SB RAS based on the hot-wire anemometric method was used. The concentration sensor was tested and calibration dependencies for the air-helium mixture were obtained, a technique for measuring the concentration of components in the gas mixture directly during the experiment was developed. The response time of the sensor to a step change in the helium concentration in the mixture was less than 0.4 seconds. Experiments were conducted to model the dynamic sorption mode during the flow of a helium-containing mixture through a selectively permeable layer of silica microspheres. Based on the experiment results, recommendations were given for preparing a stand for dynamic gas separation based on the membrane-sorption method.

Keywords

helium, microspheres, selectivity, dynamic sorption mode, gas separation

Acknowledgements

The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region (№ 23-29-10068).

For citation

Kazanin I. V., Shchiglova E. P., Zhuravleva D. V. On the Implementation of a Dynamic Sorption Mode on Selectively Permeable Microspheres for Helium Recovery. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 1, p. 37–46. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-37-46

Введение

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН ведутся работы по мембранно-сорбционному методу для разделения гелийсодержащих газовых смесей. Отличительной особенностью метода является использование в качестве мембранных элементов полых сферических микрочастиц из силикатных материалов, стенка которых обладает селективной проницаемостью по отношению к гелию [1]. Применение полых микросферических частиц в качестве мембранных элементов позволяет решить часть особенностей, связанных с силикатными материалами и мембранами на их основе, которым присущи низкие параметры проницаемости и высокие коэффициенты селективности, а именно: значительно увеличить суммарную площадь газообмена, при этом сферическая форма и малые размеры обеспечивают высокую гидростатическую прочность, что напрямую связано с параметрами производительности разделительных установок. Вследствие этого такие частицы могут использоваться как микробаллоны, во внутренний объем которых проникает гелий из смеси и удерживается в нем. Микросферы ведут себя как сорбенты для гелия, а разделение смеси основано на селективности их оболочки. Для разделения газовой смеси используется короткоцикловый режим работы установки. На первом этапе цикла гелийсодержащая смесь напускается в адсорбер и начинается процесс сорбции, гелий проникает во внутренний объем микросфер, этот процесс продолжается до выравнивания парциальных давлений вне и внутри микросфер. Далее обедненная смесь удаляется из адсорбера и, за счет создания обратного перепада давления гелия вне и внутри микросфер, начинается процесс десорбции – гелий из внутреннего объема микросфер

попадает в свободный объем адсорбера и перекачивается при помощи насосов компрессоров в специальную емкость. Обедненная же смесь направляется в следующий адсорбер, где проходят описанные выше этапы разделения – сорбция и последующая десорбция, циклы продолжают до тех пор, пока не будет достигнута нужная степень извлечения гелия из смеси.

По мере исследования различных типов микросфер и гранулированных сорбентов на их основе были выявлены образцы, обладающие высокими коэффициентами проницаемости для гелия [2]. Характерные времена сорбционных процессов составляют от 5–6 минут при температуре $\sim 20^\circ\text{C}$ до 60 секунд при температуре 110°C . При таких высоких темпах процессов поглощения становится возможным реализация динамического режима разделения гелийсодержащих смесей газов, аналогичного методу короткоциклового адсорбции. В данном случае гелийсодержащая смесь пропускается через сорбент, находящийся в протяженном адсорбере, таком, чтобы время протекания газа превышало характерные времена сорбционных процессов при этом происходит процесс сорбции, и концентрация гелия в смеси понижается. По мере насыщения сорбента подача смеси переключается на следующий адсорбер, при этом исходный адсорбер ставится на регенерацию – происходят откачка и перекачка поглощенного гелия в специальную емкость. В работе [3] проведено численное моделирование фазы обогащения в режиме короткоциклового адсорбции с использованием бифункционального сорбента на основе микросфер, которое показало возможность увеличения концентрации гелия в воздушно-гелиевой смеси практически в два раза (с 0,7 до 1,3 % по массе) при степени извлечения гелия 90,4 %.

Данная работа посвящена предварительным исследованиям мембранно-сорбционного метода разделения газов в динамическом режиме, отработке основных элементов для реализации динамического режима сорбции, включая систему измерения концентрации смеси непосредственно в темпе эксперимента.

Сорбционный материал

В качестве селективно проницаемых частиц в работе использовались кремнеземные микросферы. Как показали ранее проводимые экспериментальные исследования гелиевой проницаемости, данные микросферы обладают высокими коэффициентами проницаемости для гелия [4] и могут быть применены в качестве сорбента для динамического режима газоразделения. Микросферы представляют собой отдельные полые частицы сферической формы, изготовленные из силикатных материалов. Для используемых в работе кремнеземных микросфер, произведенных в ОАО «НПО Стеклопластик», средний размер частиц составляет 52 мкм, толщина стенки ~ 1 мкм, насыпная плотность $\sim 0,2$ г/см³. На рис. 1 представлено изображение кремнеземных микросфер, полученное с помощью оптического микроскопа и гистограмма гранулометрического распределения частиц по размеру.

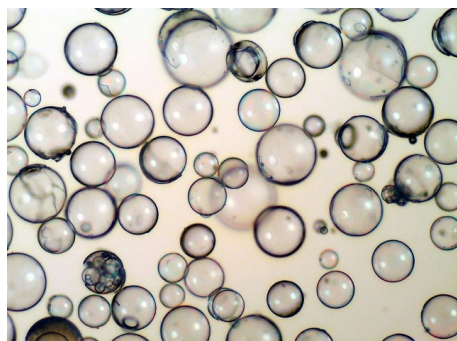
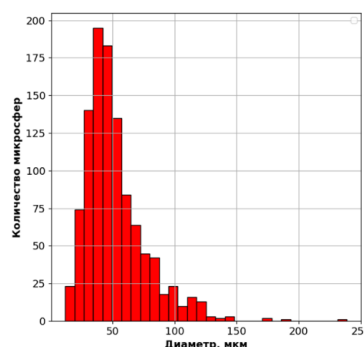
*a**б*

Рис. 1. Фотография кремнеземных микросфер (а) и гистограмма гранулометрического распределения частиц по размеру (б)

Fig. 1. Photograph of silica microspheres (a) and histogram of particle size distribution (b)

Как видно по фотографии, микросферы обладают практически идеальной сферической формой с гладкой поверхностью. На отдельных изображениях присутствуют частицы с поврежденной оболочкой, что дает возможность видеть скол стенок микросфер, проведенные измерения толщины стенки которых составляют ~ 1 мкм, что соответствует величине, заявленной производителем.

Экспериментальный стенд

Для отработки экспериментальной части по динамическому режиму сорбции на первом этапе работ использовался экспериментальный стенд, предназначенный для проведения экспериментов по измерению динамики процессов сорбции и десорбции целевого газа полыми микросферическими частицами и сорбентами на их основе. Принципиальная схема стенда представлена на рис. 2, адсорбер выполнен на основе нержавеющей трубы, с внутренним диаметром 25 мм и длиной 1120 мм, объем адсорбера $\sim 0,54$ л, рабочее давление до 1 МПа и температурный диапазон до 120 °С.

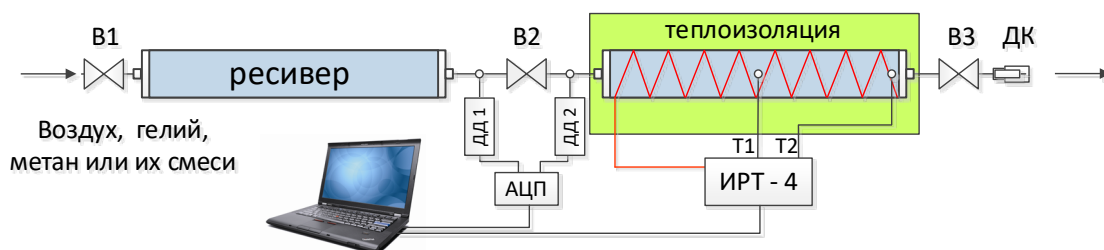


Рис. 2. Общая схема экспериментального стенда: V1, V2, V3 – вентили, ДД1, ДД2 – датчики давления, ИРТ-4 – терморегулятор, ДК – датчик концентрации
Fig. 2. General diagram of the experimental setup: V1, V2, V3 – valves, PS1, PS2 – pressure sensors, IRT-4 – thermostat, DK – concentration sensor

Ресивер, входящий в состав стенда, имеет объем 10 л, наличие ресивера позволяет существенно оптимизировать процедуру подготовки рабочего газа (смеси) перед пропуском его через адсорбер с сорбентом. Стенд снабжен системой нагрева и поддержания заданной температуры адсорбера с помощью измерителя-регулятора температуры ИРТ-4. Измерение давления в ресивере и адсорбере осуществляется с помощью датчиков давления ДД1, ДД2 – BD Sensor DMP 331i (датчик абсолютного давления) с рабочим диапазоном давлений от 0 до 2,0 МПа и точностью измерений $\pm 0,1$ %. Датчик концентрации подсоединялся к выходу адсорбера после вентиля V3 таким образом, чтобы пропускаемая в ходе эксперимента через адсорбер газовая смесь проходила через датчик. Слой кремнеземных микросфер внутри адсорбера составлял ~ 90 см. После засыпки в адсорбер микросферы поджимались внутри специальным пружинным демпфером, что исключало их перемещение внутри адсорбера при напуске/сбросе газа, а также не меняло параметры засыпки при горизонтальном или вертикально расположении адсорбера.

Датчик концентрации на основе термоанемометрического метода

Для возможности непосредственно в темпе эксперимента получать информацию об изменении концентрации компонент в газовой смеси был использован разработанный в ИТПМ СО РАН датчик концентрации для бинарных смесей газов на основе термоанемометрического метода [5]. Принцип работы данного датчика основан на определении теплопотерь на чувствительном элементе, которые пропорциональны изменению теплопроводности газовой смеси, в зависимости от концентрации составляющих ее компонент и параметров потока газа. Общая

схема и фотография датчика представлена на рис. 3. Датчик концентрации представляет собой устройство, состоящее из цилиндрического корпуса (1). Внутри корпуса находится канал (2), который начинается с диаметром 2 мм и расширяется до 6 мм, где установлена дроссельная шайба (3) с отверстием диаметром 0,5 мм. При определенном перепаде давления в канале обеспечивается течение с постоянным числом Маха $M = 0,036$. В корпусе (4) имеются отверстия для проводников (5) диаметром 0,5 мм, которые проходят через детали (4), (6) из диэлектрического материала. Чувствительные элементы, состоящие из позолоченных вольфрамовых нитей (7) диаметром 6 мкм и длиной 1,4 мм, приварены к этим проводам. Статическое давление в канале контролируется через дренажное отверстие (8) диаметром 0,5 мм. Для обеспечения перепада давления, необходимого для реализации звукового течения в канале, датчик подсоединяли к вакуумному насосу. В работе использовался термоанемометр постоянного сопротивления ТПС-6, разработанный в ИТПМ СО РАН, к которому подключался чувствительный элемент датчика концентрации.

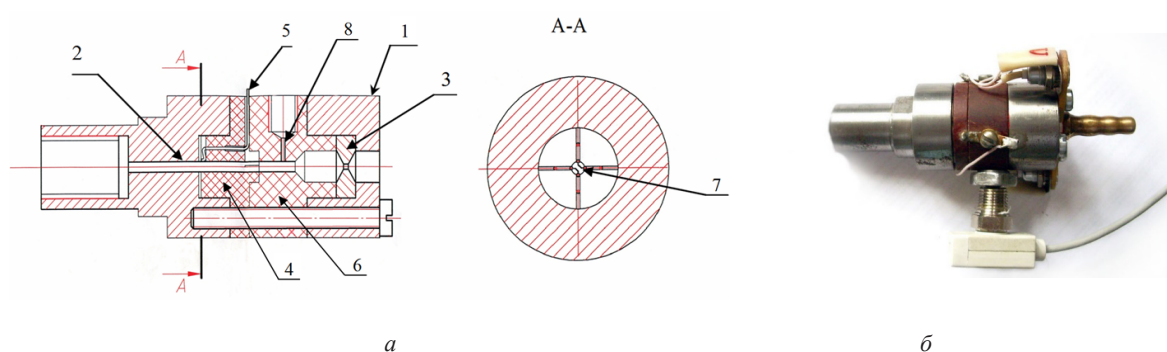


Рис. 3. Схема (а) и фотография (б) датчика концентрации
Fig. 3. Scheme (a) and photograph (b) of the concentration sensor

Таким образом, при протекании смеси через датчик концентрации часть параметров потока поддерживается неизменной за счет конструкции датчика (число Маха в канале), а другая непосредственно измеряется – температура, параметры теплообмена, давление, что и позволяет выделить влияние концентрации компонент газовой смеси на теплообмен.

Экспериментальная часть

Для корректного определения концентрации в смеси предварительно необходимо провести тарировку датчика концентрации, установив связь между измеряемыми величинами и концентрацией. На данном этапе работ по отработке элементов для реализации динамического режима сорбции в качестве рабочей газовой смеси использовалась воздушно-гелиевая смесь. Концентрация гелия в смеси варьировалась от 0 до 100 % об. Приготовление смеси происходило в ресивере по парциальным давлениям компонент. Параметр перегрева на чувствительном элементе датчика концентрации в ходе тарировок и дальнейших экспериментов задавался равным $a_w = (R_w - R_e)/R_e = 0,4$, где R_w и R_e – сопротивление нагретой и холодной нити соответственно. В ходе тарировочных экспериментов воздушно-гелиевая смесь с известной концентрацией подавалась непосредственно из ресивера на датчик концентрации. Полученные данные для тарировок могут быть представлены в виде классической зависимости в размерной форме $e^2 = f(\sqrt{P})$ и, как видно на рис. 4, имеют линейную зависимость. Следует отметить, что данные для различных концентраций воздушно-гелиевой смеси хорошо различимы между собой. Также тарировочные данные могут быть представлены в критериальной форме зависимости числа Нуссельта от корня из числа Рейнольдса.

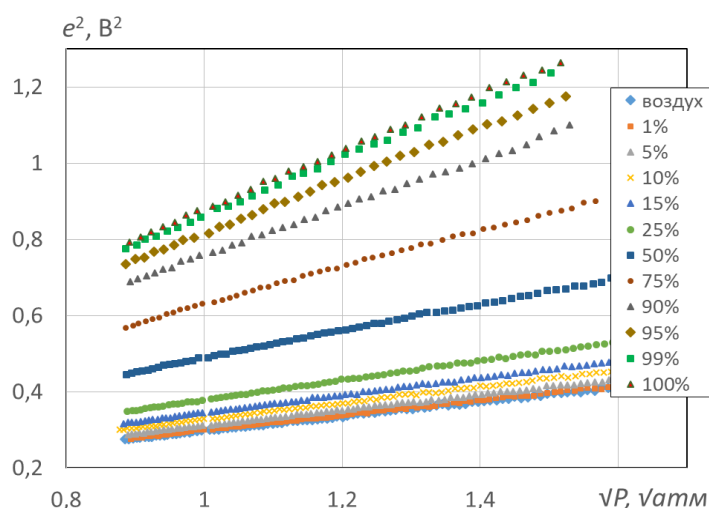


Рис. 4. Тарировки датчика концентрации для воздушно-гелиевой смеси в размерной форме
Fig. 4. Calibrations of the concentration sensor for an air-helium mixture in dimensional form

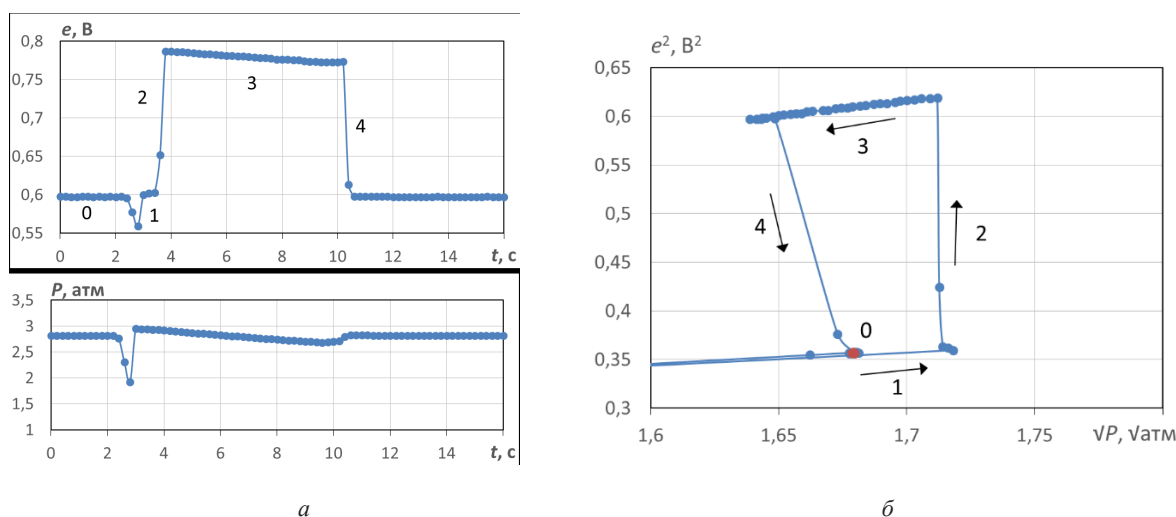


Рис. 5. Отклик датчика при ступенчатом изменении концентрации смеси на входе: данные по напряжению, давлению (а) и зависимость $e^2 = f(\sqrt{P})$ (б)

Fig. 5. Response of the sensor with a step change in the concentration of the mixture: data on voltage, pressure (a) and the dependence $e^2 = f(\sqrt{P})$ (b)

Так как при динамическом процессе сорбции гелия предполагается изменение концентрации компонент при протекании смеси через сорбционный слой, необходимо проверить отклик датчика на изменение концентрации в газовой смеси. Для этого был проведен следующий модельный эксперимент по определению отклика датчика концентрации на ступенчатое изменение концентрации компонент в смеси. В эксперименте через датчик попеременно пропускался воздух и воздушно-гелиевая смесь с концентрацией гелия 50 % об. Воздух подавался из трассы среднего давления, а смесь из ресивера, исходное давление воздуха в трассе и смеси в ресивере были приблизительно одинаковы и составляли 2,8 атм. Время опроса датчика в эксперименте составляло 0,2 секунды. На рис. 5 приведены графики изменения напряжения на чувствительном элементе, давления в канале датчика от времени и характеристическая зависимость квадрата напряжения от корня из давления во время подачи воздушно-гелиевой

смеси. В первоначальный момент времени через датчик протекает воздух, на графиках это соответствует моменту 0, на зависимости $e^2 = f(\sqrt{P})$ точки лежат вдоль линии, характерной для чистого воздуха. В момент переключения на подачу воздушно-гелиевой смеси в канале датчика концентрации кратковременно падает давление, что приводит к уменьшению теплопотери на чувствительном элементе, и термоанемометр снижает напряжение на нем. Далее смесь поступает в канал, ведущий к датчику концентрации, и первоначально, как поршень, толкает находящийся там воздух, при этом давление в канале датчика возрастает, по датчику еще протекает воздух и на зависимости $e^2 = f(\sqrt{P})$ точки ложатся на линию, характерную для воздуха, на графиках это соответствует моменту 1.

Когда воздушно-гелиевая смесь достигает чувствительного элемента датчика, теплопотери на нем значительно возрастают за счет более высокой теплопроводности смеси, термоанемометр компенсирует потери путем увеличения напряжения, это соответствует участку 2 на графиках. При этом на зависимости $e^2 = f(\sqrt{P})$ происходит переход к характеристике для смеси (участок 2). Участок 3 соответствует протеканию воздушно-гелиевой смеси, так как смесь подается из ресивера, то давление постепенно снижается. Далее происходит обратное переключение на подачу воздуха и значения на зависимости $e^2 = f(\sqrt{P})$ возвращаются в область, характерную для чистого воздуха. Данные эксперименты показывают отклик датчика на ступенчатое изменение концентрации смеси, в нашем случае характерное время реакции не превысило 0,4 секунды, что заведомо удовлетворяет требованиям экспериментов по исследованию динамических процессов сорбции, так как характерные времена сорбционных процессов составляют десятки секунд даже при повышенных температурах. В данной работе предельные характеристики датчика концентрации не исследовались. В целом же характерное время реакции складывается из характерных времен задержек в пневматической системе, частотной характеристики датчика давления и термоанемометра. При настройке термоанемометра частотная характеристика для шести микронного чувствительного элемента составляла порядка 10 кГц, характерные же частотные параметры датчиков давления составляют ~ 0,1–1 кГц, таким образом, оценочные частотные характеристики датчика концентрации могут быть довольно высоки.

Далее на описанном выше стенде были проведены эксперименты, направленные на отработку методики и моделирование динамического режима сорбции при течении гелийсодержащей смеси по селективно проницаемому слою из кремнеземных микросфер. В качестве рабочей смеси использовалась воздушно-гелиевая смесь с концентрацией гелия 50 % об. Процедура проведения эксперимента заключалась в следующем: через адсорбер с микросферами последовательно пропускается воздух, воздушно-гелиевая смесь, воздух. Давление на входе в адсорбер задавалось равным 5 атм. Датчик концентрации, подсоединенный к выходу адсорбера, фиксирует изменение концентрации компонент в протекающей смеси в ходе эксперимента. Для моделирования среды с различной гелиевой проницаемостью использовался нагрев кремнеземных микросфер, гелиевая проницаемость которых значительно зависит от температуры и увеличивается с ее повышением [4]. Увеличение гелиевой проницаемости микросфер должно приводить к размыванию фронта изменения концентрации в смеси. Эксперименты проводились при двух температурах адсорбера: комнатной 22 °С и при нагреве адсорбера до 70 °С. При таком изменении температур гелиевая проницаемость кремнеземных микросфер увеличивается в 3,5 раза.

Графики изменения напряжения на чувствительном элементе датчика от времени и характеристическая зависимость квадрата напряжения от корня из давления при протекании воздушно-гелиевой смеси через слой селективно проницаемых микросфер приведены на рис. 6.

По данным, представленным в координатах e^2 от $\sqrt{P}$, можно проследить, как происходит достаточно плавное изменение концентрации в протекающем газе (область 1), от исходных значений для воздуха (область 0), до значений, характерных для смеси (область 2) и при обратном процессе (область 3). Дополнительный скачок на графиках изменения напряжения на чув-

ствительном элементе связан с переключением подачи смеси из ресивера, на подачу воздуха из трассы и последующим повышением давления. О размытии фронта концентрации в смеси можно косвенно судить по изменению теплотерм на чувствительном элементе датчика концентрации. На рис. 7 представлено изменение напряжения на чувствительном элементе датчика концентрации при течении воздушно-гелиевой смеси через слой микросфер в нормированном виде.

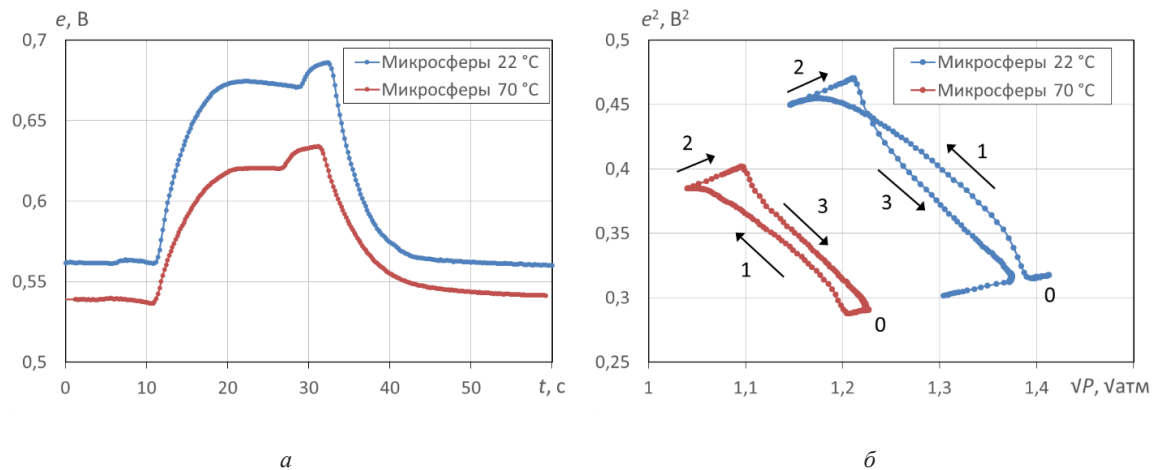


Рис. 6. Изменение напряжения на чувствительном элементе датчика концентрации (а) и зависимость $e^2 = f(\sqrt{P})$ (б) при течении воздушно-гелиевой смеси через слой микросфер
 Fig. 6. Change in voltage on the sensitive element of the concentration sensor (a) and the dependence $e^2 = f(\sqrt{P})$ (b) during the flow of an air-helium mixture through a layer of microspheres

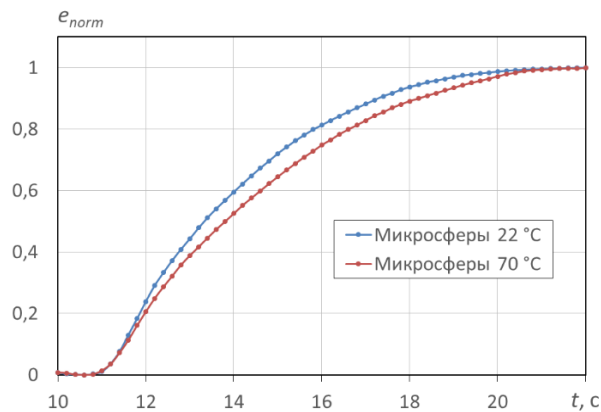


Рис. 7. Изменение напряжения на чувствительном элементе датчика концентрации при течении воздушно-гелиевой смеси через слой микросфер в нормированном виде
 Fig. 7. Voltage change on the sensitive element of the concentration sensor during the flow of an air-helium mixture through a layer of microspheres in a normalized form

Как видно на графике, фронт волны концентрации с увеличением газопроницаемости микросфер становится более пологим, но величина этого изменения незначительна. В целом, на размытие фронта волны концентрации при течении смеси по среде из микросфер влияет несколько факторов. Первый – это различные параметры течения каждой компоненты в такой среде за счет вязкости газа. Второй непосредственно связан с поглощением гелия. Для наших параметров проведения эксперимента время протекания смеси по слою микросфер составило

порядка 10–15 секунд, что значительно меньше характерных времен протекания сорбционных процессов. При этом засыпка из микросфер образует довольно плотную среду, проницаемость которой составляет ~ 2 Дарси [6]. Поэтому в текущих экспериментах первый механизм размытия фронта концентрации значительно превалировал.

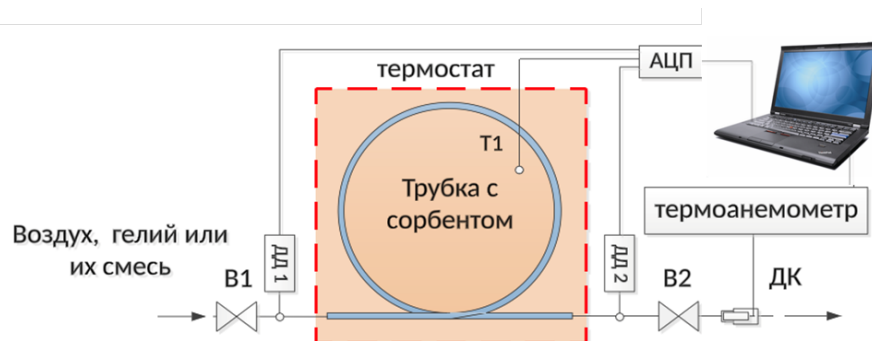


Рис. 8. Предлагаемая схема экспериментального стенда
Fig. 8. The proposed scheme of the experimental stand

Для исследований по динамическому разделению гелийсодержащих смесей газов требуется увеличение времени прохождения смеси по сорбционному слою, что может быть достигнуто путем увеличения длины адсорбера. Предполагаемая схема универсального экспериментального стенда приведена на рис. 8, в котором адсорбер представляет собой длинную трубку с определенным радиусом изгиба. Трубка может состоять из нескольких сегментов различной длины, что позволяет набирать заданную длину путем стыковки между собой нескольких сегментов. Сечение трубок определяется исходя из требуемых расходных параметров газа и измерительного оборудования, максимального перепада давления на входе и выходе.

Заключение

В ходе проведения работы протестированы и отработаны основные элементы для реализации динамического режима сорбции. На основе разработанного в ИТПМ СО РАН датчика концентрации для бинарных смесей газов отработана методика по измерению концентрации в газовой смеси непосредственно в темпе эксперимента. Проведено тестирование датчика концентрации, получены тарировочные зависимости для воздушно-гелиевой смеси. Определены параметры отклика датчика на ступенчатое изменение концентрации гелия в смеси, время реакции составило менее 0,4 секунды. Развитие системы измерения концентрации требует применения тарировочных зависимостей в критериальной форме, что позволит сделать ее более универсальной, исключить влияние температуры.

Проведены эксперименты по моделированию динамического режима сорбции при течении гелийсодержащей смеси по селективно проницаемому слою из кремнеземных микросфер. По результатам экспериментов даны рекомендации по подготовке специального стенда для проведения исследований по динамическому разделению гелийсодержащих смесей газов на основе мембранно-сорбционного метода. Для кремнеземных микросфер требуется увеличение времени прохождения смеси по сорбционному слою, что может быть достигнуто путем увеличения длины адсорбера.

Список литературы

1. **Фомин В.М., Зиновьев В.Н., Казанин И.В., Лебига В.А., и др.** Способ разделения многокомпонентной парогазовой смеси. Патент РФ № 2508156, 27.02.2014.

2. **Зиновьев В. Н., Казанин И. В., Пак А. Ю. и др.** Проницаемость полых микросферических мембран по отношению к гелию // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 1. С. 24–36.
3. **Верещагин А. С., Казанин И. В., Зиновьев В. Н., Фомин В. М.** Численное моделирование обогащения воздушно-гелиевой смеси бифункциональным сорбентом на основе стеклянных микросфер // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63, № 5. С. 3–19.
4. **Фролов М. В., Верещагин А. С., Казанин И. В.** Определение гелиевой проницаемости кремнеземных микросфер // Теплофизика и аэромеханика. 2024. Т. 31, № 2. С. 347–353.
5. **Лебига В. А., Зиновьев В. Н., Пак А. Ю., Конкин А. Я., Приходько Ю. М.** Датчик для измерения концентрации компонентов газовой смеси. Патент РФ № 2012127052/28, 10.01.2014.
6. **Kazanin I. V., Zinoviev V. N., Lebiga V. A. et al.** Experimental investigation of transport and helium permeability for hollow microspherical membranes // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1893, № 1. P. 030013.

References

1. **Fomin V. M., Zinoviev V. N., Kazanin I. V., Lebiga V. A., et al.** Method for separating a multicomponent vapor-gas mixture. *Russian Federation Patent No. 2508156*, 02.27.2014. (in Russ.)
2. **Zinoviev V. N., Kazanin I. V., Pak A. Yu., et al.** Permeability of hollow microspherical membranes to helium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, № 1, pp. 25–37. (in Russ.)
3. **Vereshchagin A. S., Kazanin I. V., Zinovyev V. N., Fomin V. M.** Numerical simulation of enrichment of the air–helium mixture with a bifunctional sorbent based on glass microspheres. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2022, vol. 63, № 5, pp. 731–745. (in Russ.)
4. **Frolov M. V., Vereshchagin A. S., Kazanin I. V.** Study of helium permeability for silica microspheres. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2024, vol. 31, № 2, pp. 321–327. (in Russ.)
5. **Lebiga V. A., Zinoviev V. N., Pak A. Yu., Konkina A. Ya., Prikhodko Yu. M.** Sensor for measuring the concentration of gas mixture components. *Russian Federation Patent No. 2012127052/28*, 10.01.2014. (in Russ.)
6. **Kazanin I. V., Zinoviev V. N., Lebiga V. A. et al.** Experimental investigation of transport and helium permeability for hollow microspherical membranes. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1893, no. 1, p. 030013.

Сведения об авторах

Казанин Иван Викторович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник

Щиглова Елизавета Павловна, лаборант

Журавлева Даниэла Владимировна, лаборант

Information about the Authors

Ivan V. Kazanin, PhD (Physics and Mathematics), Researcher

Elizaveta P. Shchiglova, Laboratory Assistant

Daniela V. Zhuravleva, Laboratory Assistant

Статья поступила в редакцию 18.11.2024;

одобрена после рецензирования 25.11.2024; принята к публикации 05.12.2024

The article was submitted 18.11.2024;

approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 05.12.2024