

**Д. В. Башкиров, О. С. Харитонов, А. В. Клинов,
В. В. Бронская**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АДСОРБЦИОННОЙ ОСУШКИ ГАЗОВ

Ключевые слова: адсорбция, осушка газа, цеолит, динамическая адсорбционная емкость, точка росы, регенерация адсорбента, экспериментальная установка.

Статья посвящена изучению процесса адсорбции как высокоэффективного физико-химического метода очистки и осушки газовых смесей, основанного на применении твердых пористых адсорбентов, таких как цеолиты и силикагели. Особое внимание уделяется исследованию динамической емкости цеолитов в процессе осушки газов, что имеет важное значение для многих отраслей химической, нефтехимической и пищевой промышленности. Цель работы – разработка экспериментальной установки, методики проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных, позволяющих определять динамическую адсорбционную емкость цеолитов по парам воды, а также исследовать закономерности процесса адсорбционной осушки газовой смеси. В ходе эксперимента получены зависимости основных параметров процесса от времени. Представленная схема лабораторной установки адсорбционной осушки позволяет гибко варьировать входные параметры и условия проведения эксперимента, изучать влияние различных факторов (тип адсорбента, характеристики газового потока) на процесс адсорбции, отслеживать движение адсорбционного фронта и фиксировать время проскока. Предложенная методика и созданная установка представляют собой эффективный инструмент для сравнительного исследования и обоснованного подбора адсорбентов при осушке газовых, воздушных и паровоздушных смесей в промышленных и лабораторных условиях.

**D. V. Bashkirov, O. S. Kharitonova, A. V. Klinov,
V. V. Bronskaya**

EXPERIMENTAL SETUP FOR STUDYING ADSORPTION DRYING OF GASES

Keywords: adsorption, gas drying, zeolite, dynamic adsorption capacity, dew point, adsorbent regeneration, experimental unit.

The article is devoted to the study of the adsorption process as a highly efficient physico-chemical method for cleaning and drying gas mixtures based on the use of solid porous adsorbents such as zeolites and silica gels. Special attention is paid to the study of the dynamic activity of zeolites in the process of drying gases, which is important for many branches of the chemical, petrochemical and food industries. The purpose of the work is to develop and describe in detail the experimental setup and methods of conducting the experiment and processing experimental data, which make it possible to determine the dynamic adsorption capacity of zeolites by water vapor, as well as to investigate the patterns of the process of adsorption drying of the gas mixture. During the experiment, the dependences of the main process parameters on time were obtained. The presented scheme of the laboratory installation of adsorption drying allows you to flexibly vary the input parameters and conditions of the experiment, study the influence of various factors on the adsorption process, track the movement of the adsorption front and record the slip time. The proposed method and the created installation represent an effective tool for comparative research and reasonable selection of adsorbents during drying of gas, air and vapor-air mixtures in industrial and laboratory conditions.

Адсорбенты — это твердые пористые вещества с большой удельной поверхностью (чем выше удельная поверхность, тем эффективнее процесс адсорбции). Адсорбенты имеют поры, которые выполняют важную роль в процессе адсорбции. В процессе адсорбции происходит заполнение пор: чем больше их количество, тем больше сможет поглотить адсорбент. Пory адсорбента классифицируются на макропоры (более 50 нм), переходные поры (2–50 нм) и микропоры (до 2 нм) [1-6].

Одно из основных достоинств физической адсорбции — это ее обратимость. Таким образом, адсорбент применяется неоднократно, что снижает эксплуатационные затраты.

Среди множества задач промышленной адсорбции осушка газов выходит на первый план — особенно для природного газа и других газовых смесей. Хотя раньше технология чаще ассоциировалась с осветлением жидкостей, сегодня она жизненно важна для удаления влаги из газовых сред, разделения смесей и рекуперации растворителей. В условиях растущих требований к

чистоте веществ именно глубокая осушка газов определяет высокую значимость этого процесса в наши дни. Ключевое значение осушка приобретает при трубопроводной транспортировке газа: удаление паров воды полностью исключает риск образования газогидратов, которые в противном случае приводят к закупорке газопроводов и серьезным эксплуатационным проблемам [7].

Перед проведением адсорбционной осушки цеолит должен быть подготовлен или, другими словами, полностью осушен от влаги, которая могла попасть в образец при транспортировке цеолита или его загрузке в адсорбер. Известно несколько оптимальных способов регенерации цеолитов с учетом сохранения их механических и адсорбционных свойств [8-15]. Один из способов — регенерация осушенным воздухом в электропечи. Данный вид регенерации проводят на созданной экспериментальной установке регенерации, представленной на рис. 1.

Полная регенерация проводится следующим образом: цеолит или твердый адсорбент,

предварительно загруженный в адсорбер 10, помещают в гнездо электропечи 12. Входной штуцер адсорбера соединяют резиновым шлангом 9 с системой осушки воздуха. Система осушки воздуха для подачи в адсорбер состоит из игольчатого вентиля 1, патрона для очистки воздуха от механических примесей 2, зажима 3, ротаметра 4, кранов 5 и 7, патрона с осушителем 6, подготовленным предварительно. Потенциометр предназначен для подключения термопар и датчиков с токовым выходом и позволяет управлять наблюдать, контролировать и управлять температурой в электропечи 12.

Воздух, предварительно осушенный в патроне 6, проходит через адсорбер с испытуемым цеолитом и сбрасывается в атмосферу. Для регенерации цеолитов в электропечи температура составляет 500°C, время регенерации — 4–5 часов, скорость продувки необходимо поддерживать в диапазоне 0,5–1,0 дм³/мин.

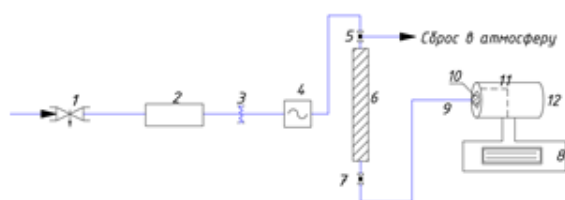


Рис. 1 - Принципиальная схема установки регенерации твердого материала: 1 - вентиль игольчатый; 2 - патрон для очистки воздуха; 3 - зажим; 4 - ротаметр; 5 - трехходовой кран; 6 - патрон с осушителем; 7 - двухходовой кран; 8 - потенциометр; 9 - резиновый шланг; 10 - адсорбер с регенерируемым цеолитом; 11 - термопара; 12 - электропечь

Fig. 1 - Schematic diagram of a solid material regeneration system: 1 - needle valve; 2 - air purification cartridge; 3 - clamp; 4 - rotameter; 5 - three-way valve; 6 - cartridge with desiccant; 7 - two-way valve; 8 - potentiometer; 9 - rubber hose; 10 - adsorber with regenerable zeolite; 11 - thermocouple; 12 - electric furnace

Для изучения механизма адсорбционной осушки газовых смесей была создана экспериментальная установка и разработана методика адсорбционной осушки (рис. 2), которая позволяет проводить процесс поглощения паров воды из влажной газовой смеси слоем адсорбирующего материала (цеолита) и оценить динамическую емкость твердого материала (цеолита).

Технические характеристики и условия проведения эксперимента представлены в таблице 1. Поток газовой смеси либо из баллона, либо из компрессора (воздуходувки), проходя через вентиль 1, патрон 2, ротаметр 3 и счетчик газа, поступает в систему предварительного увлажнения. Система увлажнения состоит из склянки Дрекслея 6, заполненной до половины водой, ловушек 5, 7 и патрона 8, заполненного стеклянной ватой для улавливания капельной жидкости. При этом склян-

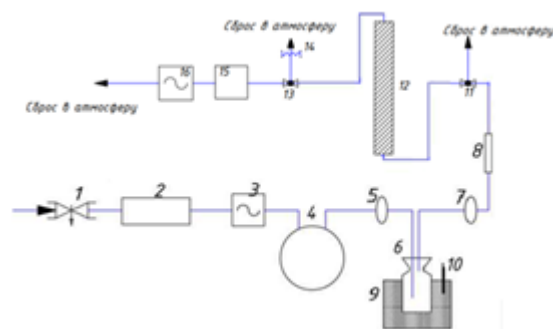


Рис. 2 – Принципиальная схема установки адсорбционной осушки газовой смеси, применяемая для определения динамической емкости цеолита по парам: 1 - вентиль игольчатый; 2 - патрон для очистки воздуха; 3, 16 - ротаметры; 4 - газовый счетчик; 5, 7 - ловушка; 6 - склянка Дрекслея; 8 - патрон-каплеотбойник; 9 - термостат; 10 - термометр; 11, 13 - трехходовой кран; 12 - адсорбер; 14 - зажим; 15 - измеритель влажности газов (ИВГ)

Fig. 2 – Schematic diagram of an adsorption drying system for a gas mixture, used to determine the dynamic vapor capacity of zeolite: 1 – needle valve; 2 – air purification cartridge; 3, 16 – rotameters; 4 – gas meter; 5, 7 – trap; 6 – Drexel flask; 8 – droplet separator cartridge; 9 – thermostat; 10 – thermometer; 11, 13 – three-way valve; 12 – adsorber; 14 – clamp; 15 – gas humidity meter (GHM)

Таблица 1 – Характеристики и условия проведения эксперимента

Table 1 – Experimental Parameters and Conditions

Габаритные размеры адсорбера, ВхД, мм	430x25
Температура газового потока (воздуха), °C	20±5
Температура окружающего воздуха, °C	20±5
Относительная влажность окружающего воздуха (при температуре воздуха +25 °C), %, не более	80
Расход очищаемой смеси, дм³/мин	6,0±0,25
Концентрация влаги, мг/дм³	13±15

ка Дрекслея должна находиться в термостате 9 при постоянной температуре 15 ± 5 °C. В результате получают влажную газовую смесь с заданным влагосодержанием (например, влагосодержание для смеси воздуха при данных условиях составило 13–15 мг/дм³).

Расход воздуха устанавливают по ротаметру 3 через кран 11. После настройки расхода кран 11 переключают на «адсорбцию» и направляют газовую

смесь через адсорбер 12 с испытуемым цеолитом. На выходе из адсорбера получают осушенный газ. С помощью крана 13 и зажима 14 осушенный газ делится на два потока: один поток с расходом 5 дм³/мин сбрасывается в атмосферу через зажим 14, а второй поток с расходом 1 дм³/мин поступает на прибор ИВГ 15 для определения точки росы и далее сбрасывается в атмосферу. Испытания проводят до достижения проскоковой концентрации по парам воды (точка росы по прибору ИВГ). Во время проведения эксперимента записывают время достижения заданной проскоковой концентрации, показания газового счетчика (до и после испытания), массу цеолита (до и после испытания).

Показания с прибора ИВГ 15, а именно температура точки росы, относительная влажность и температура газового потока, передаются посредством выходных сигналов. SCADA-система осуществляет сбор, обработку и запись в память компьютера всех данных, поступающих от прибора.

Данная схема установки адсорбционной осушки предоставляет возможность варьировать исходные параметры, регистрировать ключевые характеристики, а также осуществлять исследования процесса адсорбции. Дополнительно имеется возможность анализировать влияние различных факторов, исследовать перемещение адсорбционного фронта и фиксировать время проскока.

Установки, показанные на рисунках 1 и 2, смонтированы так, что на них можно выполнять как регенерацию цеолита, так и с осушку газа определением динамической емкости по парам воды путем перемещения адсорбера и переключением вентилей. Ключевое преимущество — экономия: нет необходимости в двух отдельных установках, достаточно одной, что уменьшает занимаемую площадь и снижает количество необходимого оборудования.

Для проведения эксперимента в качестве адсорбента был выбран цеолит NaX по ТУ 38.10281-88 (с изм. 1–12). В результате получены зависимости температуры точки росы от времени, относительной влажности газового потока от времени (рис. 3). Насыпная плотность цеолита, согласно паспорту, составляла 0,71 г/см³.

Динамическая емкость по парам воды рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{M_2 \cdot \rho_{\text{нас}}}{M_1},$$

где $\rho_{\text{нас}}$ — насыпная плотность цеолита, мг/см³ (указывается в паспорте на материал), M_2 — масса воды, адсорбированной испытуемым цеолитом (мг), M_1 — масса загруженного в адсорбер цеолита (мг).

По итогу выполнения эксперимента возможно рассчитать среднюю концентрацию адсорбированной воды испытуемым цеолитом, приходящуюся на единицу объема пропущенной паровоздушной смеси

$$C = \frac{M_2}{V}$$

где V — объем пропущенной газовой смеси (дм³).

В таблице 2 представлены тестовые результаты экспериментов на созданной установке адсорбционной осушки газа на цеолите NaX. Проведенные эксперименты свидетельствуют о хорошей воспроизводимости экспериментальных данных, что свидетельствует о надежности работы установки.

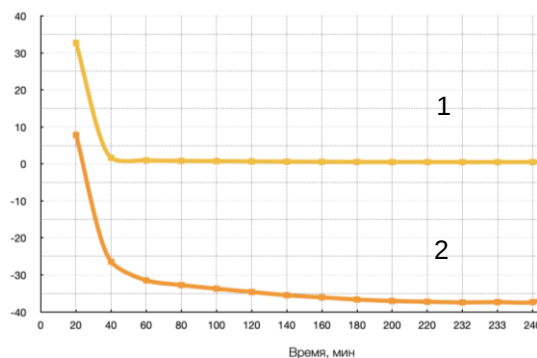


Рис. 3 – График зависимости температуры точки росы и относительной влажности от времени, полученный путем SCADA-системы: 1 – влажность газа, %; 2 – температура точки росы, °C

Fig. 3 – Graph showing the relationship between dew point temperature and relative humidity as a function of time, obtained via the SCADA system: 1 – gas humidity, %; 2 – dew point temperature, °C

Таблица 2 – Результаты проведенных лабораторных экспериментов

Table 2 – Results of the laboratory experiments

Эксперимент	1	2
Средняя концентрация, мг/дм ³	15,99	15,94
Температура точки росы, °C	-37,45	-37,74
Время выдержки, мин	233	251

Предложенная методика эксперимента позволяет определить характеристики процесса, такие как динамическая адсорбционная емкость адсорбентов по парам воды, время защитного действия слоя (момент наступления проскока).

Конструкция установки и гибкость методики позволяют варьировать тип адсорбента (цеолиты, силикагели) и параметры газового потока (влажность, температура, расход), что делает разработанную экспериментальную установку эффективным инструментом для сравнительного тестирования промышленных адсорбентов и оптимизации режимов работы осушительного оборудования.

Литература

1. А.А. Филимонова, Р.Ф. Камалиева, А.Ю. Власова, *Вестник Технологического университета*, **28**, 11. – С. 76-81 (2025).
2. С. И. Мишина, Н. Г. Вилкова, Е. К. Рожкова, А.А. Флягин, *Вестник Технологического университета*, **28**, 7, С. 64-68 (2025)
3. Т.О. Самакаева, *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*, 2, 29-35 (2013).

4. Б.Ж. Сафаров, С.Б. Усмонов, А.Р. Хафизов, Б.Н. Сирохов, *Universum: технические науки*, 11-6(104), 5-11 (2022).
5. Б.Ж. Сафаров, Б.Х. Саломов, И.И. Элов, Ф.К. Рузикулов, *Наука и образование сегодня*, 2(3), 9-11 (2016).
6. А.Б.У. Кобиллов, М.Я. Хужжиев, *Вопросы науки и образования*, 11(12), 25-26 (2017).
7. Газогидраты // Мусор и Экология. Сайт о проблемах мусора и экологии в современном мире URL: <https://musoreko.ru/alternativnaya-energetika/gazogidraty.html> (дата обращения: 09.04.2026)
8. Н.В. Кельцев, *Основы адсорбционной техники. 2-е издание, переработанное и дополненное*. М.: Химия, 1984. 592с.
9. А. Н. Плановский, В. М. Рамм, С. З. Каган. *Процессы и аппараты химической технологии: учебник для химических техникумов МХП*. Москва: Госхимиздат, 1955. 580 с.
10. Ю.И. Дытнерский, *Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. В 2-х кн. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты*. М.: Химия, 1995. 368 с.
11. Д.В. Башкиров, А.В. Клинов, А.И. Разинов, *Вестник Казанского технологического университета*, 16, 22, 238-239 (2013).
12. Д.В. Башкиров, А.В. Клинов, А.И. Разинов, *Вестник Казанского технологического университета*, 17, 19, 365-368 (2014)
13. С.П. Рудобашта, *Массоперенос в системах с твердой фазой*. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
14. Е.Н. Нуруллина *Вестник Казанского технологического университета*, 15, 9, 179-181 (2012).
15. Каримов Р.Р., Шулаев М.В., Емельянов В.М., Гадельшина Г.А. *Вестник Казанского технологического университета*, 1, 99-102 (2004).
2. S.I. Mishina, N.G. Vilkoval, E.K. Rozhkova, A.A. Flyagin, *Herald of Technological University*, 28, 7, pp. 64–68 (2025)
3. T.O. Samakaeva, *Environmental Protection in the Oil and Gas Industry*, 2, 29–35 (2013).
4. B. Zh. Safarov, S. B. Usmonov, A. R. Khafizov, B. N. Sirozhov, **Universum: Technical Sciences**, 11-6(104), 5–11 (2022).
5. B.Zh. Safarov, B.Kh. Salomov, I.I. Elov, F.K. Ruzikulov, *Science and Education Today*, 2(3), 9–11 (2016).
6. A.B.U. Kobilov, M.Ya. Khuzhzhiev, *Issues of Science and Education*, 11(12), 25–26 (2017).
7. Gas Hydrates // Waste and Ecology. A website on waste and environmental issues in the modern world URL: <https://musoreko.ru/alternativnaya-energetika/gazogidraty.html> (accessed: April 9, 2026)
8. N.V. Keltsev, *Fundamentals of Adsorption Technology. 2nd edition, revised and expanded*. Moscow: Khimiya, 1984. 592 pp.
9. A.N. Planovsky, V.M. Ramm, S.Z. Kagan. *Processes and Apparatus in Chemical Technology: A Textbook for Chemical Technical Schools of the Ministry of Chemical Industry*. Moscow: Goshimizdat, 1955. 580 pp.
10. Yu. I. Dytnersky, *Processes and Apparatus in Chemical Technology: A Textbook for Universities. In 2 vols. Part 2. Mass Transfer Processes and Apparatus*. Moscow: Khimiya, 1995. 368 pp.
11. D.V. Bashkirov, A.V. Klinov, A.I. Razinov, *Herald of Kazan Technological University*, 16, 22, 238–239 (2013).
12. D.V. Bashkirov, A.V. Klinov, A.I. Razinov, *Herald of Kazan Technological University*, 17, 19, 365–368 (2014)
13. S.P. Rudobashta, *Mass Transfer in Systems with a Solid Phase*. – Moscow: Khimiya, 1980. – 248 pp.
14. E.N. Nurullina, *Journal of Kazan Technological University*, 15, 9, 179–181 (2012).
15. Karimov R.R., Shulaev M.V., Emelyanov V.M., Gadelishina G.A. *Herald of Kazan Technological University*, 1, 99–102 (2004).

References

1. A.A. Filimonova, R.F. Kamaliev, A.Yu. Vlasova, *Herald of Technological University*, 28, 11. – pp. 76–81 (2025).

© Д. В. Башкиров – к.т.н., доцент каф. Процессов и аппаратов химической технологии (ПАХТ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, dbashkirov@mail.ru; В. В. Бронская – к.т.н., доцент каф. ПАХТ КНИТУ, dweronika@mail.ru; О. С. Харитонов – аспирант каф. ПАХТ КНИТУ, os_kharitonova@mail.ru; А. В. Клинов – д.т.н., проф., зав. каф. ПАХТ КНИТУ, alklin@mail.ru.

© D. V. Bashkirov – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Processes and Apparatuses of Chemical Technology (PACT), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, dbashkirov@mail.ru; V. V. Bronskaya – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, the PACT department, KNRTU, dweronika@mail.ru; O. S. Kharitonova – PhD-Student, the PACT department, KNRTU, os_kharitonova@mail.ru; A. V. Klinov – Doctor Sciences (Technical Sci.), Full Professor, Head of the PACT department, KNRTU, alklin@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 26.05.26.

Дата принятия рукописи в печать – 20.06.26.