

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОСУШЕНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА С ХОЛОДНОЙ И ГОРЯЧЕЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ АДСОРБЕНТА

Е.С. Руднева

eva_bar.95@mail.ru

SPIN-код: 8375-7415

А.С. Иншакова

Inshakova.anna@list.ru

SPIN-код: 7983-6541

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Показана целесообразность использования аппаратов для осушения сжатого воздуха. Рассмотрены процессы адсорбции с холодной и горячей регенерацией адсорбента. На основе диаграммы термодинамических свойств воздуха проведены расчеты для определения потерь сжатого воздуха при десорбции адсорбента для рабочего давления 5, 7, 10, 20, 40 бар. Получены графическая зависимость потерь сжатого воздуха от температуры точки росы для холодной регенерации адсорбента и зависимость потерь сжатого воздуха от температуры нагревателя для горячей регенерации адсорбента. Рассмотрены методики построения изотерм адсорбции, необходимые для изучения процессов кинематики и динамики адсорбции и регенерации.

Ключевые слова

Осушитель, адсорбент, адсорбер, адсорбция, регенерация, изотермы сорбции, потери, мощность, сжатый воздух

Поступила в редакцию 30.05.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. На выходе из любого компрессора воздух содержит влагу и примеси, при наличии которых происходит следующее:

- 1) влага замерзает (образуются гидраты) и засоряет трубопроводы в холодную погоду;
- 2) наличие конденсата вызывает коррозию;
- 3) водная эмульсия (смесь смазочного материала с водой) засоряет каналы;
- 4) конденсат вытесняет смазку, что приводит к износу трущихся деталей;
- 5) выходящий воздух может иметь характеристики, не соответствующие требованиям потребителя.

Таким образом, после выхода из компрессора воздух необходимо осушать.

Осушители воздуха бывают двух типов: адсорбционные и холодильные. Остановимся подробнее на адсорбционных осушителях.

Процесс адсорбции представляет собой уплотнение адсорбтива на поверхности адсорбента, обусловленное физическими силами притяжения (силами Ван-дер-Ваальса). Это экзотермический процесс, т. е. он протекает с выделением энергии. Адсорбент — вещество, обладающее поглощательной способностью. Адсорбтив — поглощаемое вещество, находящееся в газовой или жидкой форме (в неадсорбированном состоянии). Адсорбированное вещество называют адсорбатом.

Достоинствами адсорбционных осушителей являются простота конструкции, несложность работы, тонкая очистка воздуха (0,1...0,5 мг/м). К недостаткам относятся потери давления в аппарате, механическое разрушение адсорбента, снижение его активности в процессе эксплуатации, потери энергии [1].

В качестве адсорбентов наиболее широкое применение нашли активированный уголь, цеолиты, силикогели и алюмогели [2].

При адсорбции адсорбент поглощает влагу, и для дальнейшего его использования необходимо выполнить регенерацию (десорбцию). Существует два вида регенерации: холодная (PSA) и горячая (TSA).

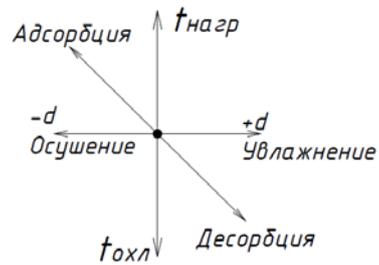
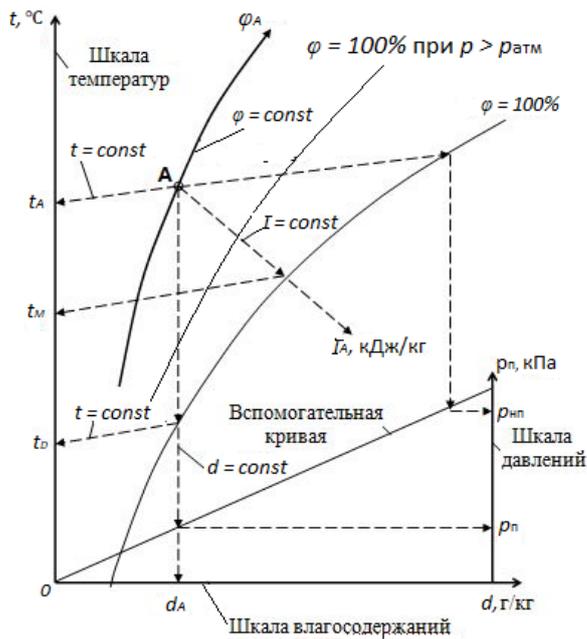


Рис. 1. Структура диаграммы термодинамических свойств влажного воздуха [3]

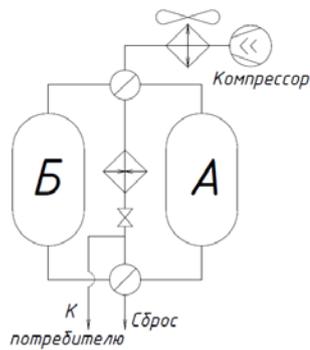


Рис. 2. Адсорбционный осушитель с холодной регенерацией адсорбента

Диаграмма термодинамических свойств влажного воздуха. Для исследования термодинамических процессов, связанных с влажным воздухом, используют $i-d$ -диаграмму (рис. 1). Она построена в косоугольной системе координат. По оси ординат расположены значения удельной энтальпии. По оси абсцисс под углом 135° к оси i откладывают влажосодержание d . Также на диаграмме представлены линии постоянной энтальпии и относительной влажности [3].

Адсорбционное осушение воздуха с холодной регенерацией. Принципиальная схема работы адсорбционного осушителя с холодной регенерацией адсорбента представлена на рис. 2.

Рассмотрим i - d -диаграмму для адсорбции воздуха с холодной регенерацией адсорбента (рис. 3).

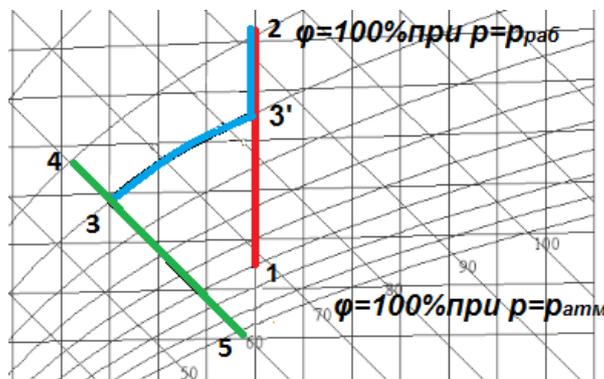


Рис. 3. i - d -диаграмма для адсорбции воздуха с холодной регенерацией адсорбента

Процесс 1–2 соответствует сжатию воздуха в компрессоре, что сопровождается повышением давления, температуры и энтальпии. Забор воздуха происходит из окружающей среды с атмосферным давлением (точка 1). Точка 2 соответствует сжатому состоянию воздуха (на выходе из компрессора):

$$pV = \nu RT,$$

где p — давление нагнетания компрессора; V — объем полости нагнетания; ν — количество вещества; R — газовая постоянная; T — температура нагнетания, К.

Нагревание воздуха происходит при постоянном влагосодержании. Температуру нагнетания компрессора определяют по формуле

$$t_2 = t_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}},$$

где n — показатель политропы.

Луч процесса строят по линии $d = \text{const}$ до пересечения с изотермой t_2 .

Начальное и конечное значение энтальпии, кДж/кг, определяют по формуле [4]

$$i = 1,006t + \frac{d}{1000}(2501 + 1,805t).$$

Зная начальное и конечное значение энтальпии, определяют количество теплоты, кВт, необходимое для нагрева воздуха [4]:

$$Q_T = G_c(i_2 - i_1),$$

где G_c — расход сухого воздуха, кг/с.

Процесс 2–3 соответствует охлаждению и конденсации воздуха в конечном охладителе. При охлаждении вместе с температурой может наблюдаться

уменьшение влагосодержания за счет конденсации [5]. Реальный процесс охлаждения и конденсации воздуха происходит по кривой, находящейся в треугольнике 2–3'–3. Процесс конденсации проходит по линии насыщения при рабочем давлении [4].

Количество теплоты, кВт, отводимое от воздуха при охлаждении [4]:

$$Q_x = G_c(i_2 - i_3).$$

Расход сухого воздуха, кг/с [4]:

$$G_c = \frac{G_b}{1 + d/1000},$$

где G_b — количество влажного воздуха, кг/ч.

Масса сконденсированной влаги, кг [6]:

$$M_b = G_c(d_2 - d_3).$$

Процесс 3–4 соответствует адсорбции воздуха.

Ранее было показано, что процесс адсорбции проходит по изоэнтальпе.

Во время адсорбции температура воздуха возрастает. Для определения конечной температуры (точка 4) пользуются формулой [4]

$$t_4 = t_3 + \frac{r}{c_b} \frac{(d_3 - d_4)}{1000},$$

где r — удельная теплота парообразования, кДж/кг; c_b — удельная теплоемкость влажного воздуха, кДж/(кг · °С),

$$c_b = 1,006 + 1,805d_3.$$

Для построения точки 4 вычисляют температуру t_4 и угловой коэффициент ϵ . Затем проводят луч процесса до пересечения с линией $d_2 = \text{const}$.

Для определения количества влаги, отводимой в адсорбере, кг/ч, используют формулу [4]

$$G_a = \frac{G_c(d_3 - d_4)}{1000}.$$

Уравнения, описывающие тепло- и влагоперенос к поверхности адсорбента [4]:

$$\begin{cases} q = \alpha(t_n - t_{\text{пов}})f; \\ m = \beta(d_n - d_{\text{пов}})f, \end{cases}$$

где q — удельный тепловой поток из воздуха к поверхности адсорбента; α — коэффициент теплопередачи; t_n и d_n — температура и влагосодержание потока соответственно; $t_{\text{пов}}$ и $d_{\text{пов}}$ — температура и влагосодержание воздуха в пограничном слое у поверхности гранул адсорбента соответственно; f — площадь грану-

лы адсорбента; m — удельный поток влаги из воздуха к поверхности адсорбента; β — коэффициент массоотдачи.

Процесс 4–5 соответствует десорбции адсорбента. Для процесса десорбции необходим подвод теплоты, который осуществляется за счет теплоты адсорбента. Ошибка при выборе температуры десорбции может привести к разрушению адсорбента или неполной десорбции. [6]. Минимальную температуру, при которой следует проводить десорбцию, называют пороговой [3].

Долю воздуха, %, который идет на регенерацию, определяют из уравнения материального баланса:

$$\frac{G_{\text{рег}}}{G_{\text{компр}}} = \frac{d_3 - d_4}{d_5 - d_4},$$

где $G_{\text{рег}}$ — массовый поток воздуха на регенерацию; $G_{\text{компр}}$ — массовый поток воздуха после компрессора; d — влагосодержание воздуха по i - d -диаграмме.

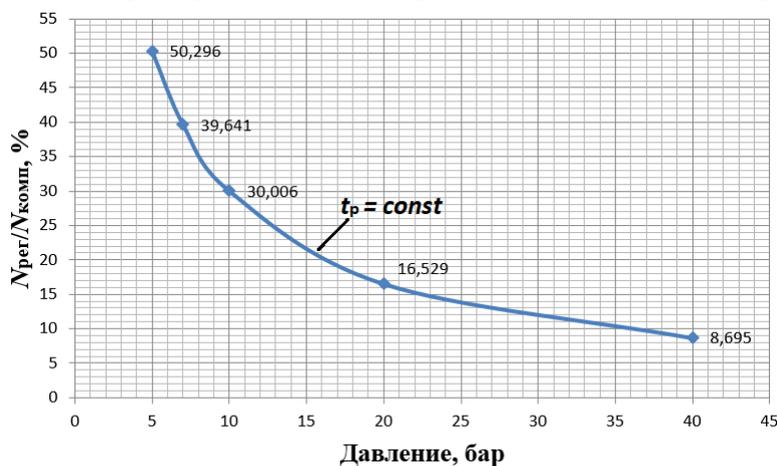


Рис. 4. Потери мощности при холодной регенерации адсорбента

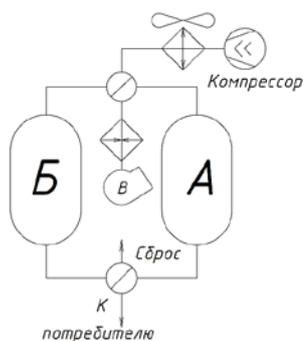


Рис. 5. Адсорбционный осушитель газа с горячей регенерацией адсорбента

Потери потока на регенерацию пропорциональны потерям мощности на регенерацию адсорбента:

$$\frac{G_{\text{рег}}}{G_{\text{комп}}} \approx \frac{N_{\text{рег}}}{N_{\text{комп}}}.$$

Зависимость потерь мощности при холодной регенерации адсорбента в зависимости от давления представлена на рис. 4.

Адсорбционное осушение воздуха с горячей регенерацией. Рассмотрим адсорбционное осушение газа с горячей регенерацией адсорбента (рис. 5).

Процессы осушения сжатого воздуха с горячей внешней регенерацией адсорбента в i - d -диаграмме представлены на рис. 6.

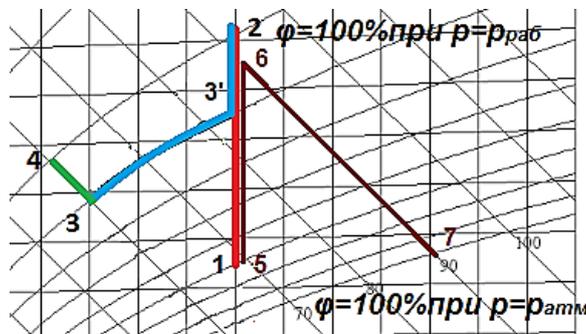


Рис. 6. i - d -диаграмма для адсорбции воздуха с горячей регенерацией адсорбента

Процессы 1–2, 2–3 и 3–4 соответствуют процессам адсорбционного осушения воздуха с холодной регенерацией.

Процесс 5–6 соответствует нагреву адсорбента. В отличие от адсорбции с холодной регенерацией после адсорбции воздух из внешней среды нагревается до температуры t_6 в точке 6 (процесс 5–6). Далее начинается процесс десорбции 6–7.

Для адсорбции с горячей регенерацией адсорбента справедливо выражение

$$\frac{G_{\text{вент}}}{G_{\text{компр}}} = \frac{(d_3 - d_4)\tau_{\text{ад}}}{(d_5 - d_4)\tau_{\text{дес}}},$$

где $\tau_{\text{ад}}$ — время адсорбции; $\tau_{\text{дес}}$ — время нагревания и регенерации (десорбции) адсорбента.

Принимаем

$$\tau_{\text{ад}} = 2\tau_{\text{дес}}.$$

На основе полученных данных выполнен анализ затрат мощности на нагревателе:

$$\frac{N_{\text{нагр}}}{N_{\text{комп}}} = \frac{c_v \eta_{\text{мех}}}{i_2 - i_1} \frac{G_{\text{вент}}}{G_{\text{комп}}} (t_{\text{нагр}} - t_{\text{окр}}),$$

где $N_{\text{нагр}}$ — мощность нагревателя,

$$N_{\text{нагр}} = c_v G_{\text{вент}} (t_{\text{нагр}} - t_{\text{окр}});$$

$N_{\text{комп}}$ — мощность компрессора,

$$N_{\text{комп}} = \frac{G_{\text{комп}}(i_2 - i_1)}{\eta_{\text{мех}}},$$

$c_v = 1,005$ кДж/(кг · К) — удельная теплоемкость воздуха; $\eta_{\text{мех}}$ — механический КПД; i_1, i_2 — значение энтальпии в точках 1 и 2 соответственно; $t_{\text{нагр}}$ — температура нагревателя; $t_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды.

Зависимость затрат мощности в зависимости от рабочих давлений при температуре нагревателя 135 °С представлена на рис. 7.

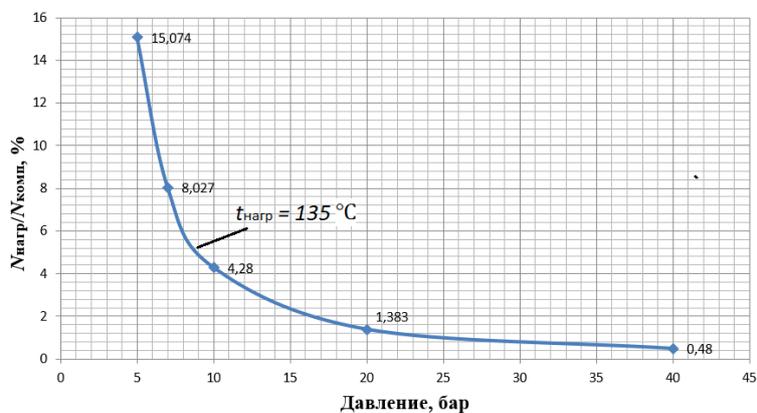


Рис. 7. Затраты мощности при горячей регенерации адсорбента

Различные методы измерения адсорбции. Прямые адсорбционные измерения можно выполнять в статических условиях, когда перенос адсорбтива на поверхность адсорбента обусловлен преимущественно диффузией (соответствующие адсорбционные установки и методы называются статическими) или из потока газа-носителя, принудительно перемещаемого относительно адсорбента. Последние называют проточными или динамическими методами измерения адсорбции.

Статические методы. К статическим методам измерения изотерм адсорбции относят объемный (волюметрический) и весовой (гравиметрический) метод.

Волюметрический метод. Для проведения измерений этим методом необходим насос, способный обеспечить вакуум порядка $10^{-3} \dots 10^{-4}$ мм рт. ст.

Общий принцип измерения состоит в том, что прибор шаг за шагом повышает давление от нулевого до давления насыщенного пара. В таком эксперименте измеряют два параметра — равновесное давление и соответствующий объем адсорбированного газа. Для того чтобы определить, какой именно объем газа адсорбирован образцом, выполняют стандартную процедуру испытаний.

Весовой метод. Весовой метод базируется на измерении веса образца за счет адсорбции. Для измерения веса используют высокочувствительные электронные микровесы. Измерения проводят путем периодического изменения давления адсорбтива в газовом объеме с выдержкой до установления равновесия, которое определяется по прекращению изменений массы.

Большее распространение волюметрического метода объясняется, по-видимому, тем, что высокочувствительные электронные микровесы проще в изготовлении, их наиболее важный прецизионный узел — датчик (или датчики) давления — достаточно стандартный узел многих приборов, производимый в больших количествах. В то же время гравиметрический метод, кроме тех же датчиков давления, предусматривает использование прецизионных электронных микровесов в герметичном исполнении.

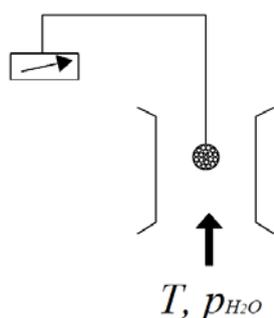


Рис. 8. Упрощенная схема установки для проведения испытаний в лабораторных условиях

Сопоставим достоинства и недостатки этих двух статических методов. Важным преимуществом весового метода является прямое измерение адсорбции (привеса) в каждой точке изотермы, вне зависимости от числовых значений, полученных при предыдущих измерениях. В объемном методе на каждом шаге измеряют приращения адсорбции и суммируют приращения на всех предыдущих шагах. Это приводит к накоплению погрешности измерения [7].

Для исследования процесса адсорбции разработана схема установки (рис. 8), предназначенная для проведения процесса адсорбции паров воды из смеси с воздухом слоем адсорбента.

Газ (влажный воздух) подается из компрессора или с помощью вентилятора в верхнюю часть, проходит через капсулу с адсорбентом и сбрасывается в атмосферу. Расход газа определяется с помощью диафрагмы и дифманометра. Относительную влажность задает пользователь. Газ проходящий через капсулу с силикагелем наполняет адсорбент влагой, тем самым масса капсулы увеличивается до момента насыщения адсорбента. Выходные данные регистрирует прибор (весы). В установку можно добавить калорифер (печь), позволяющий изменять температуру воздуха, подаваемого на капсулу (от комнатной до примерно 100 °С) [8].

Полученные изотермы будут больше похожи на кривые, изображенные на рис. 9. Изотермы получены в статических, нормальных условиях при температуре $t = 20...23\text{ °C}$ [9].

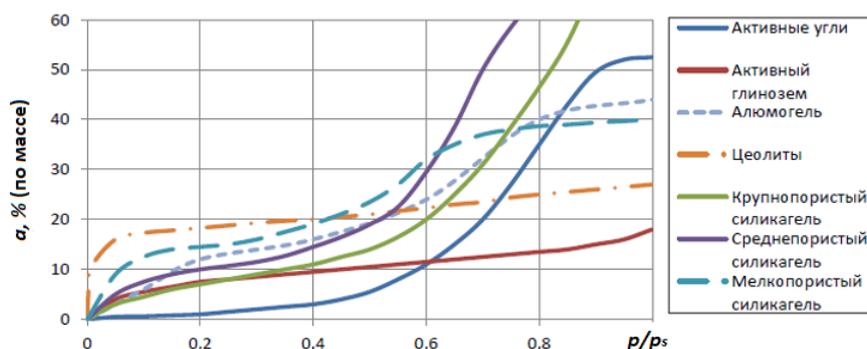


Рис. 9. Изотермы адсорбции паров воды на различных промышленных адсорбентах при $t = 20...23\text{ °C}$ (a — статическая адсорбционная способность; p — рабочее давление; p_s — давление насыщенного пара)

Такая схема позволяет варьировать входные данные и снимать основные характеристики процесса, проводить различные исследования процесса адсорбции, изучать влияние различных параметров на процесс.

Выходные параметры необходимо настраивать с помощью ряда опытов. Это означает, что для заведомо известного адсорбента определенной фирмы изотерма сорбции должна получиться такой же, как в паспорте продукта. Таким образом осуществляется настройка стенда, в результате которой можно проводить испытания уже с известными погрешностями, при этом используя простую и относительно недорогую установку.

Помимо процесса адсорбции установка позволяет исследовать также процессы десорбции. Подобные опыты необходимо проводить с использованием печи.

Все это открывает новые возможности для исследования процесса адсорбции компримированного воздуха и изучения характеристик адсорбентов и их изотерм сорбции.

Для осушения адсорбента чаще всего применяют атмосферный воздух, предварительно нагретый до необходимой температуры в калориферах различных конструкций. Продолжительность и температуру процесса сушки обычно предварительно рассчитывают по уравнениям теплового баланса с учетом кинетики процесса.

Охлаждение адсорбента обычно осуществляется атмосферным воздухом. Время охлаждения определяется временем, необходимым для достижения в слое температуры, при которой проходит первая стадия процесса — адсорбция.

Схема стенда, используемая в лабораторных исследованиях, показана на рис. 10.

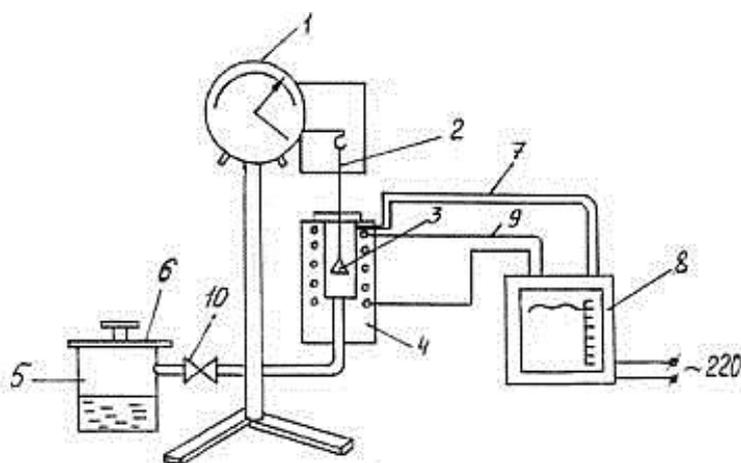


Рис. 10. Схема стенда [10]:

- 1 — весы; 2 — подвеска капсулы (кюветы); 3 — капсула с адсорбентом; 4 — нагревательная печь;
 5 — склянка с водой; 6 — крышка; 7 — термопара; 8 — потенциометр для регулирования
 и записи температуры в печи; 9 — провод питания нагревателя; 10 — запорный вентиль

Заключение. На основании проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Использование $i-d$ -диаграммы сжатого воздуха для рабочих давлений системы осушитель — компрессор позволяет провести анализ энергозатрат на осушение сжатого воздуха по технологиям холодной и горячей регенерации.

2. Для технологии холодной регенерации затраты сжатого воздуха и соответственно энергии сжатия в диапазоне низких и высоких давлений различаются в 4–5 раз.

3. Для технологии горячей регенерации затраты энергии связаны с нагревом адсорбента. По мере увеличения рабочих давлений соотношение мощности нагревателя и мощности компрессора будет уменьшаться.

4. Для изучения характеристик адсорбента в экспериментальной установке используется весовой метод. Важным преимуществом весового метода является прямое измерение адсорбции (привеса) в каждой точке изотермы вне зависимости от числовых значений, полученных при предыдущих измерениях.

Литература

- [1] Борзенко И.Е., Зайцев А.В. Автоматизированное проектирование блока адсорбции. СПб., НИУ ИТМО, ИХиБТ, 2014.
- [2] Автономова И.В. Компрессорные станции и установки. Ч. 2. Методы очистки газа на компрессорных станциях. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
- [3] Id диаграмма влажного воздуха. Расчет. Как пользоваться. *xiron.ru: веб-сайт*. <http://www.xiron.ru/content/view/30258/28/> (дата обращения: 15.05.2019).
- [4] Тарабонов М.Г. Кондиционирование воздуха. Ч. 1. М., Авок-пресс, 2015.
- [5] Козлов В.В., Шадрин В.С., Рахманов М.А. Метод и программа расчета процессов тепла- и массопереноса при адсорбционном осушении сжатого воздуха. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2017, № 3. DOI: 10.24108/aplts.0317.0000062 URL: <https://maplants.elpub.ru/jour/article/view/62>
- [6] Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М., Химия, 1984.
- [7] Дубинин М.М. Физико-химические основы сорбционной техники. М., Государственное химико-техническое издательство, 1932.
- [8] Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты газоочистки. Пенза, Изд-во ПГУ, 2006.
- [9] Есипова Е.В. Адсорбционная сероочистка дизельного газоконденсатного топлива. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. М., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015.
- [10] Башкиров Д.В., Клинов А.В., Разинов А.И. Экспериментальная установка для изучения процесса адсорбции. *Вестник казанского технологического университета*, 2013, № 22, с. 238–239.

Руднева Ева Сергеевна — студентка кафедры «Вакуумная и компрессорная техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Иншакова Анна Сергеевна — студентка кафедры «Вакуумная и компрессорная техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Козлов Владимир Владимирович, кандидат технических наук кафедры «Вакуумная и компрессорная техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE PROCESSES
OF DRYING COMPRESSED AIR WITH COLD
AND HOT ADSORBENT REGENERATION**

E.S. Rudneva

eva_bar.95@mail.ru

SPIN-code: 8375-7415

A.S. Inshakova

Inshakova.anna@list.ru

SPIN-code: 7983-6541

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article shows the expediency of using apparatus for drying compressed air. Adsorption processes with cold and hot adsorbent regeneration are considered. Based on the diagram of air thermodynamic properties, calculations were performed to determine the loss of compressed air during desorption of the adsorbent for a working pressure of 5, 7, 10, 20, 40 bar. The graphical dependences are obtained of compressed air losses on dew point temperature for cold adsorbent regeneration and of compressed air losses on heater temperature for hot adsorbent regeneration. The methods of constructing adsorption isotherms necessary for studying the processes of kinematics and dynamics of adsorption and regeneration are considered.

Keywords

Desiccant, adsorbent, adsorber, adsorption, regeneration, sorption isotherms, losses, power, compressed air

Received 30.05.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Borzenko I.E., Zaytsev A.V. Avtomatizirovannoe proektirovanie bloka adsorbtsii [Automated design of absorption unit]. Sankt-Petersburg, NIU ITMO, IKhiBT Publ., 2014 (in Russ.).
- [2] Avtonomova I.V. Kompessornye stantsii i ustanovki. Ch. 2. Metody ochistki gaza na kompressornykh stantsiyakh [Compressor plants and systems. P. 2. Gas purification methods at compressor plants]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011 (in Russ.).
- [3] d diagramma vlazhnogo vozdukha. Raschet. Kak pol'zovat'sya [Id diagram of wet air. Calculation. How to use.]. *xiron.ru: website* (in Russ.). <http://www.xiron.ru/content/view/30258/28/> (accessed: 15.05.2019).
- [4] Tarabonov M.G. Konditsionirovanie vozdukha. Ch. 1 [Air conditioning. P. 1]. Moscow, Avok-press Publ., 2015 (in Russ.).
- [5] Kozlov V.V., Shadrin V.S., Rakhmanov M.A. Method and program to calculate heat and mass transfer processes during adsorption drying of compressed air. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya* [Machines and Plants: Design and Exploiting], 2017, no. 3. DOI: 10.24108/aplts.0317.0000062 URL: <https://maplants.elpub.ru/jour/article/view/62> (in Russ.).
- [6] Kel'tsev N.V. Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki [Foundations of adsorption technique]. Moscow, Khimiya Publ., 1984 (in Russ.).

- [7] Dubinin M.M. Fiziko-khimicheskie osnovy sorbtionnoy tekhniki [Physical-chemical foundations of sorption technique]. Moscow, Gosudarstvennoe khimiko-tekhnicheskoe izdatel'stvo Publ., 1932 (in Russ.).
- [8] Vetoshkin A.G. Protsessy i apparaty gazoочистki [Processes and apparatus for gas purification]. Penza, Izd-vo PGU Publ., 2006 (in Russ.).
- [9] Esipova E.V. Adsorbtsionnaya seroочистka dizel'nogo gazokondensatnogo topliva. Avtoref. diss. kand. tekh. nauk [Adsorption desulfurization of diesel gas condensate fuel. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Gubkin University Publ., 2015 (in Russ.).
- [10] Bashkirov D.V., Klinov A.V., Razinov A.I. Experimental set-up for study on adsorption process. *Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, no. 22, pp. 238–239 (in Russ.).

Rudneva E.S. — Student, Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Inshakova A.S. — Student, Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Kozlov V.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.