

УДК 620.197

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ОСУШЕНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ СИЛИКАГЕЛЯ ПРИ КОНСЕРВАЦИИ АГРЕГАТОВ ПАРОВОДЯНОГО ТРАКТА ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Голдаев Сергей Васильевич,

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической и промышленной
теплотехники Энергетического института ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: SVGoldaev@rambler.ru

Хушвактов Алишер Асанович,

аспирант кафедры теплотехники и теплотехнического оборудования
Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими,
Республика Таджикистан, 734042, г. Душанбе,
ул. Академиков Раджабовых, 10. E-mail: alisher1001@mail.ru

Актуальность работы определяется необходимостью защиты агрегатов пароводяного тракта ТЭС при простоях от стояночной атмосферной коррозии.

Цель работы: провести сопоставительный анализ вариантов осушения воздуха в агрегатах пароводяного тракта ТЭС с помощью силикагеля, размещая его в одноразовых контейнерах, или использования псевдооживленного слоя.

Методы исследования: на основе апробированных методик прогнозирования характеристик установок для осушения воздуха от паров воды адсорбентами осуществлена оценка их применимости в агрегатах пароводяного тракта ТЭС.

Результаты: Рассмотрена задача о консервации агрегатов пароводяного тракта тепловой электрической станции с помощью адсорбентов (силикагелей, цеолитов и др.), широко применяющихся при сушке и разделении газов и жидкостей, в процессе очистки дымовых газов от диоксида углерода. Отмечено, что при поддержании требуемой влажности в замкнутых объемах осушение происходит в статических условиях. Процесс насыщения силикагелей влагой характеризуется малой скоростью, зависящей в основном от размеров его гранул. Влагоемкость силикагеля при фиксированной относительной влажности газа изменяется незначительно. Кроме того, рассмотрен вариант исполнения устройства для осушения воздуха в пароводяном тракте тепловой электрической станции с помощью гранул адсорбента, находящихся в псевдооживленном состоянии, в котором происходит механическое взаимодействие частиц адсорбента друг с другом и с внутренними поверхностями аппарата. В промышленных адсорбционных установках часто используются аппараты такого типа с непрерывным принципом действия, что эффективно при улавливании целевых компонентов из отходящих газовых потоков больших расходов. Установлено, что для снижения с 98 до 20 % относительной влажности воздуха, заполняющего резервуар вместимостью 10 м³, требуется 1 кг технического силикагеля с минимальной влагоемкостью, равной 0,2, что в 25 раз меньше значения, рекомендуемого в ПТЭ. В рамках модели адсорбционной установки с псевдооживленным слоем необходима масса силикагеля 7...12 кг для осушения влажного воздуха с объемным расходом, соответствующим промышленным адсорберам. Однако эта схема сложнее для реализации внутри агрегатов пароводяного тракта ТЭС.

Ключевые слова:

Адсорбция, десорбция, осушение воздуха, пароводяной тракт ТЭС, псевдооживленный слой, коррозия, силикагель, турбина, регенерация, диффузия, цеолит.

Водяной пар, содержащийся в воздухе и в газах, конденсируется уже при незначительном охлаждении и приводит к коррозии узлов, трубопроводов, котлов и других агрегатов пароводяного тракта тепловых электрических станций (ТЭС) [1].

Опыт эксплуатации ТЭС показывает, что при некачественном проведении консервации их агрегатов конденсация влаги, содержащейся в воздухе и в газах, во время останова со снижением давления среды до атмосферного и попадании во внутренний объем кислорода воздуха вызывает стояночную атмосферную коррозию (САК) углеродистой стали [2].

Успешное решение многосторонней проблемы защиты агрегатов пароводяного тракта ТЭС при простоях от САК позволит повысить их рабочий ресурс, уменьшить материальные потери в результате коррозии металлов, снизить загрязнение окружающей среды [3].

Для консервации внутренних металлических поверхностей котельных агрегатов (КА) возможно применение ингибиторов, создающих защитные пленки, покрывающие все участки поверхностей агрегатов ТЭС [4, 5]; использование инертного газа; снижение относительной влажности воздуха, достигаемое нагреванием [6] или осушением [7]. Однако такие предложения, как отмечено в работе [8], связаны с большими затратами электрической энергии.

Принимая во внимание большое количество агрегатов ТЭС, эксплуатируемых в России, для которых необходима консервация, следует отнести рассматриваемую задачу к разряду актуальных. Это подтверждается и многочисленными публикациями.

Перспективным представляется использование для консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС адсорбентов (силикагелей, цеолитов и т. п.),

которые широко применяются при сушке и разделении газов и жидкостей [9, 10], в процессах очистки дымовых газов от диоксида углерода [11], в холодильной технике [12, 13], фармакологии [14] и др.

Целью настоящей работы является выполнение сопоставительного анализа вариантов осушения воздуха в агрегатах пароводяного тракта ТЭС с помощью силикагеля: размещение его в одноразовых контейнерах или подача в режиме псевдооживленного слоя (ПОС).

При консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС, поддержании заданной влажности в замкнутых объемах достаточно широко распространено осушение в статических условиях. Количество загружаемого адсорбента в этом случае определяется в основном равновесной адсорбционной емкостью. Среди адсорбентов выделяется силикагель вследствие его масштабного промышленного производства и низкой цены [15]. Процесс насыщения силикагелей влагой в статических условиях характеризуется малой скоростью. Длительность полного насыщения при комнатной температуре мелкопористых силикагелей составляет 40 ч, среднепористых – 50 ч и крупнопористых – 75 ч [16, 17]. При фиксированной относительной влажности газа влагоемкость (g_c) силикагеля изменяется незначительно, вне зависимости от температуры, при которой происходит процесс поглощения [18].

Известно, что при относительном влагосодержании среды (φ) до 55 ... 60 % максимальной адсорбционной способностью по парам воды обладает мелкопористый силикагель (насыпная плотность порядка 700 кг/м³). В интервале $\varphi=70...80$ % предпочтительнее среднепористый силикагель. Преимущества крупнопористого силикагеля ($\rho_c \sim 400...500$ кг/м³) реализуются при $\varphi > 90$ % [14].

На практике в статических условиях для поддержания влажности в частично герметичном объеме сухой силикагель более или менее равномерно распределяется по контролируемому объему. Общее количество адсорбента зависит от проницаемости и размеров оболочки, поступления влаги с проникающим через неплотности воздухом. Масса адсорбента тем больше, чем выше заданная продолжительность хранения, и обратно пропорциональна равновесной адсорбционной емкости, которая может быть определена по изотерме адсорбции, соответствующей температуре хранения, и предельно допустимой для изделий данного вида относительной влажности среды [16].

Анализ зависимости количества поглощенной воды силикагелем от относительной влажности воздуха показал, что при $\varphi < 70$ % g_c линейно повышается до 36 %, а при $\varphi = 70 ... 100$ % влагоемкость возрастает от 36 до 40 % [16].

В работе [19] на основе термодинамического подхода была оценена масса адсорбента M_a , которую можно будет использовать для поглощения паров воды из воздуха, находящегося при давлении

p_b в свободном пространстве агрегата пароводяного тракта ТЭС, имеющего вместимость V_b при относительной влажности φ_1 и температуре T_{b1} . Согласно техническим условиям консервации для предотвращения образования налета ржавчины агрегат должен находиться при влажности φ_2 и температуре T_{b2} [8]. Поглощающая способность 1 кг адсорбента (силикагеля) принималась равной g_{ps} воды.

Было получено, что для осушения воздуха с $\varphi_1 = 98$ %, находящегося внутри агрегатов вместимостью 100 м³, требуется около 9,5 кг силикагеля с $g_{ps} = 0,2$.

Например, для котла БКЗ-210–140 с суммарными водяным и паровым объемами 94 м³ потребуется 9 кг силикагеля. С использованием габаритных размеров турбины Т-12–35/1,2 [20] для верхней оценки вместимости ее кожуха получено 20 м³, соответственно $M_c \approx 2$ кг. При цене 1 кг технического силикагеля 50 р. [15], затраты на его приобретение и использование будут малыми. По опыту проведения консервации водогрейного котла КВГМ-100–150 осушенным воздухом, подача которого осуществлялась от установки ВОУ-2000 в выходной сетевой трубопровод диаметром 400 мм [6], силикагель можно разместить в этом месте в виде поглотительных контейнеров. В случае необходимости можно повторить несколько раз эту процедуру.

Отраслевым нормативом [21] рекомендовано 1,5...2,5 кг силикагеля на 1 м³ внутреннего объема консервируемого котла, что превышает примерно в 25 раз полученную выше оценку. Подробности обоснования такой массы силикагеля в [21] не приведены. Возможно, существенное расхождение значений массы адсорбента обусловлено учетом дополнительной массы воды, сохраняющейся в эксплуатационных отложениях на внутренних поверхностях нагрева [6].

Рассмотрим другой вариант исполнения устройства для осушения воздуха в пароводяном тракте ТЭС с помощью гранул адсорбента, находящихся в псевдооживленном состоянии, в котором происходит механическое взаимодействие частиц адсорбента друг с другом и с внутренними поверхностями аппарата [22]. В ходе расчета адсорбционного процесса определяются концентрации целевого компонента в газе-носителе на выходе из слоя адсорбента.

При функционировании аппаратов с ПОС адсорбента происходит значительное перемешивание дисперсного материала по высоте слоя, имеющего величину 60...100 мм, что обеспечивает удовлетворительное псевдооживление [22]. Предполагается, что осуществляется полное перемешивание адсорбента, которому соответствует постоянное значение средней степени обработки адсорбента по всему объему слоя.

В промышленных адсорбционных установках часто используются аппараты ПОС непрерывного действия с постоянной подачей и выгрузкой адсор-

бента, что эффективно при улавливании целевых компонентов из отходящих газовых потоков больших расходов. Поэтому допустимо применять их в условиях меньших расходов воздуха.

Алгоритм прогнозирования характеристик для ПОС с использованием номограмм описан в монографии [22]. Однако в рассмотренном примере представлены результаты расчета одного варианта, что не позволяет проанализировать возможности альтернативного способа для рассматриваемой задачи.

Расчет массы адсорбента, требуемой для осушения воздуха в ПОС, проведен по соотношениям для непрерывного режима адсорбции. Реализация процесса осушения воздуха в режиме фильтрации его через ПОС адсорбента позволяет рассматривать полученные результаты для массы адсорбента как оценку «снизу».

Приближенный расчет характеристик адсорбера непрерывного действия основывается на уравнении материального баланса [22]

$$W_b(C_0 - C_k) = W_a(a_{md} - a_n) = \beta_{0v}\Delta C_{md}F, \quad (1)$$

где C_0 и C_k – начальная и конечная концентрации паров воды, кг/м³; a_{md} , a_n – средняя степень отработки дисперсного адсорбента в объеме ПОС и на выходе из него; W_c , W_a – объемные расходы газа-носителя и адсорбента; F – суммарная площадь поверхности частиц в объеме слоя.

Средняя по высоте слоя движущая разность концентраций адсорбтива вычисляется следующим образом

$$\Delta C_{md} = (C_0 - C_k) / \ln \left[\frac{C_0 - C_s(a_{md})}{C_k - C_s(a_{md})} \right], \quad (2)$$

где $C_s(a_{md})$ – концентрация адсорбтива в газе, равновесная среднему его содержанию в частицах адсорбента; для условий полного перемешивания частиц в ПОС является постоянной, однако неизвестной величиной.

В ходе приближенного расчета предполагаются известными такие параметры: W_b , C_0 , C_k и a_n . Величина коэффициента массообмена (β_{0v}) определялась из критериального уравнения [22]

$$\frac{\beta_{0v}d_a^2}{D_w} = 4,0 \left(\frac{W_a d}{D_w} \right)^{0,70} \left(\frac{C_{mx}}{C_0} \right)^{0,35} \left(\frac{\beta^2}{BT^2} \right)^{1,1}, \quad (3)$$

где d_a – диаметр частиц адсорбента; C_{mx} – предельная концентрация целевого компонента в адсорбенте; D_w и C_0 – коэффициент диффузии адсорбтива и начальная концентрация его паров в воздухе.

При расчете W_a используется величина минимального расхода адсорбента W_{amn} , при котором на выходе из аппарата степень отработки адсорбента находится в равновесии с заданным значением входной концентрации в газовой фазе

$$W_{amn}(a_s - a_n) = W_b(C_0 - C_k). \quad (4)$$

Для адсорберов такого типа действительный расход адсорбента принимается больше минимального на 10...30 %

$$W_a = k_z W_{amn}. \quad (5)$$

Проиллюстрируем применение описанной методики на следующем примере из монографии [22]. В качестве адсорбента предполагался цеолит, для которого известны необходимые для методики физико-химические характеристики. По своей активности он превосходит силикагель в 1,5 раза. Приведенные в [23] результаты расчетов габаритно-массовых характеристик адсорберов воздухо-разделительных установок среднего давления, заполненных цеолитом NaX, находятся в качественном соответствии с упомянутыми данными для силикагеля.

Адсорбер с ПОС предназначен для поглощения паров воды с начальной концентрацией $C_0 = 3,8 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ из потока воздуха с $W_b = 0,50$ м³/с. Конечная концентрации паров воды: $C_k = 0,04 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, их коэффициент афинности $\beta = 2,53$. При температуре 20 °С концентрация насыщенных паров воды $C_s = 17,2 \cdot 10^{-3}$ кг/м³. Диаметр частиц адсорбента $d_a = 2,0 \cdot 10^{-3}$ м, их плотность $\rho_a = 1200$ кг/м³, содержание воды в исходном адсорбенте $a_n = 0,5$ кг/м³. Коэффициент диффузии паров воды в воздухе $D_w = 2,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Структурная константа для цеолита $B = 5,5 \cdot 10^{-8}$ 1/К². Изотерма адсорбции при температуре 20 °С предполагается близкой к линейной

$$a_{sc} = K_a(C/C_s), \quad (6)$$

где $K_a = 679,4$ – коэффициент аппроксимации для цеолита, найденный из анализа результатов промежуточных вычислений рассматриваемого примера.

Критерий Рейнольдса для воздушного потока, проходящего через ПОС, вычисляется по формуле [22]

$$Re_b = \frac{Ar_b \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar_b \cdot \varepsilon^{4,75}}},$$

где ε – порозность слоя, принимается равной 0,5; Ar_b – критерий Архимеда, определяется таким образом

$$Ar_b = \frac{gd^3(\rho_T - \rho_b)}{\nu_b^2 \rho_b}.$$

Здесь ρ_b , ν_b – плотность и коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре 20 °С.

В усовершенствованной методике расчета необходимые теплофизические свойства воздуха находились с помощью интерполяционных зависимостей из справочника [24].

Средняя скорость газа на полное сечение слоя

$$w_b = \nu_b \cdot Re_b / d_T.$$

Диаметр корпуса аппарата цилиндрической формы

$$D_{ap} = \sqrt{4V_b / (\pi w_b)}.$$

Минимальный объемный расход адсорбента определялся по уравнению (4)

$$W_{mn} = W_b(C_0 - C_k) / [a_s(C_k) - a_n],$$

в котором согласно изотерме адсорбции (6) $a_{sc}(C_k)=1,58 \text{ кг/м}^3$.

С учетом максимального значения запаса по расходу адсорбента согласно (5)

$$V_T = 1,3 \cdot V_{mn}.$$

Значение β_{0v} на выходе из аппарата определялось по уравнению (3).

Средняя концентрация влаги, поглощенной адсорбентом, находилась из уравнения материального баланса

$$a_{md} = a_n + (V_b / M_T)(C_0 - C_k). \quad (7)$$

По изотерме адсорбции (6) с учетом (7) вычислено $C_{sc}(a_{md})=3,37 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$.

Средняя движущая разность концентраций в газовой фазе вычислялась по формуле (2).

По уравнению (1) находился объем и масса адсорбента в ПОС

$$V_a = V_b(C_0 - C_k) / \beta_{0v} \Delta C_{md}; \quad M_a = \rho_a V_a. \quad (8)$$

Объем и высота ПОС

$$V_{sl} = V_a / \varepsilon; \quad H_{cl} = 4V_{cl} / (\pi D_{ap}^2).$$

Описанная методика была реализована на Турбо Паскале. Приведенные выше исходные данные и результаты расчета из монографии [22] использовались для тестирования составленной программы.

В ходе параметрического анализа выявлялась зависимость массы цеолита и размеры ПОС от ряда входных параметров.

Снижение объемного расхода воздуха W_b от 0,5 до 0,3 м³/с привело к уменьшению массы цеолита от 8,7 до 7,4 кг (рис. 1).

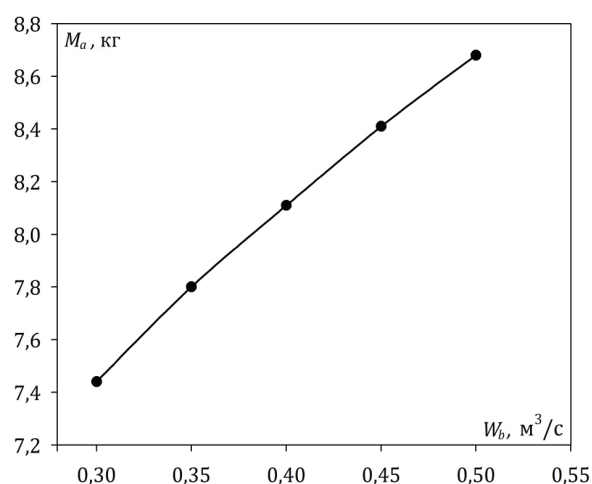


Рис. 1. Зависимость массы цеолита от объемного расхода воздуха

Fig. 1. Zeolite mass dependence on air volume flow

На рис. 2 представлены результаты влияния варьирования C_0 на требуемую массу адсорбента. Такое поведение кривой может быть объяснено зависимостью объема адсорбента от β_{0v} . Согласно соотношению (8) $W_a \sim 1/\beta_{0v}$, а значение β_{0v} , вычисленное по интерполяционной формуле (3), возрастает от 440 при $C_0=0,0038 \text{ кг/м}^3$ до 612 1/с при $C_0=0,0098 \text{ кг/м}^3$.

Как видно, для осушения воздуха с достаточно высокими значениями объемных расходов, сравнимых с расходами в промышленных установках, требуется несколько килограммов цеолита. Поэтому можно воспользоваться предложенным выше коэффициентом пересчета, и считать, что массы силикагеля будут превышать в 1,5 раза приведенные на рис. 1, 2 значения массы для цеолита.

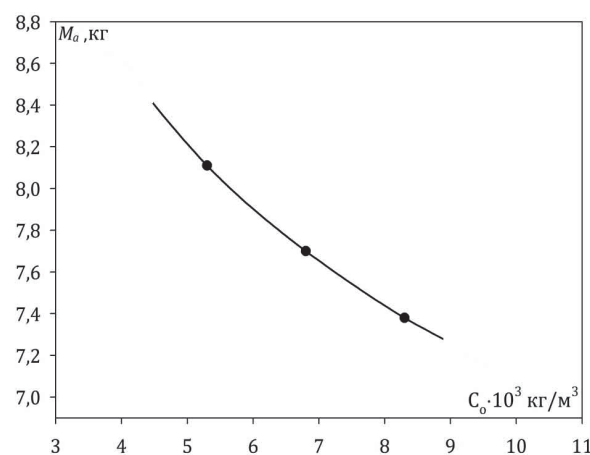


Рис. 2. Зависимость массы цеолита от начальной концентрации паров воды в воздухе

Fig. 2. Zeolite mass dependence on initial concentration of water vapor in the air

Выводы

В рамках модели адсорбционной установки с ПОС определена необходимая масса силикагеля, составляющая 7...12 кг. Этот режим эффективен из-за развитой поверхности массообмена, с другой стороны, энергоемок и сложнее по конструкции, нежели предложенный вариант с одноразовыми контейнерами, заполненными силикагелем. Во втором варианте несколько увеличиваются размеры адсорберов, но упрощается и удешевляется конструкция вследствие отказа от участка псевдооживления и стадии десорбции.

Разработанная автоматизированная методика расчета характеристик осушения воздуха с помощью адсорбционной установки с ПОС уточняет результаты, облегчает выполнение параметрического анализа на стадии проектирования и может быть использована в учебном процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троянский Е.А., Чоловский В.Н. Повышение долговечности элементов котельного оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 80 с.
2. Сутоцкий Г.П. Повреждения энергетического оборудования, связанные с водно-химическим режимом. – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1992. – 256 с.
3. Богачев А.Ф. Предотвращение коррозии и повреждений оборудования пароводяного тракта ТЭС // Теплоэнергетика. – 2001. – № 7. – С. 65–71.
4. Чернышев Е.В., Вепров Е.Н., Петров В.А. Повышение коррозионной стойкости оборудования при использовании пленкообразующих аминов // Электрические станции. – 2005. – № 11. – С. 15–18.
5. Шатова И.А. Совершенствование защиты от стояночной коррозии углеродистой стали котлов на основе применения ингибиторов октадециламина и М-1: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2005. – 148 с.
6. Полевич А.Н. Разработка, исследование и внедрение процессов и схем воздушной консервации теплоэнергетического оборудования: дис.... канд. техн. наук. – М., 2001. – 137 с.
7. Вишневецкий Е.П. Анализ особенностей использования основных методов осушения воздуха // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2004. – № 3. – С. 5–8.
8. Вишневецкий Е.П., Чепурин Г.В. Консервация осушенным воздухом // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2010. – № 5. – С. 8–12.
9. White J. CFD Simulation of silica gel and water adsorbent beds used in adsorption cooling system. PhD. Diss. – Birmingham, 2012. – 210 p.
10. White J. Computational fluid dynamics modelling and experimental study on a single silica gel type B / Modelling and Simulation in Engineering. – 2012. – V. 2012. – ID 598479. – P. 130–139.
11. Kierzkowska A.M., Pacciani R., Müller C.R. CaO-based CO₂ sorbents: From fundamentals to the development of new, highly effective materials // ChemSusChem. – 2013. – V. 6. – Iss. 7. – P. 1130–1148.
12. Simulation of water sorption dynamics in adsorption chillers: One, two and four layers of loose silicagrain / A. Freni, G. Maggio, F. Cipiti, Y.I. Aristov // Applied Thermal Engineering. – 2012. – V. 44. – P. 69–77.
13. Study of a novel silica gel-water adsorption chiller. P. I. Design and performance prediction / D.C. Wang, Z.Z. Xia, J.Y. Wu, R.Z. Wang, H. Zhai, W.D. Dou // International Journal of Refrigeration. – 2005. – № 28. – P. 1073–1083.
14. Остриков А.Н. Процессы и аппараты пищевых производств: в 2 кн. Кн. 2. – СПб.: ГИОРД, 2007. – 608 с.
15. Обзор рынка силикагеля в СНГ. ООО «Инфолайн» (Исследовательская группа). URL: <http://www.infomine.ru/research/18/441> (дата обращения: 15.11.2013).
16. Серпионова Е.Н. Промышленная адсорбция газов и паров. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1969. – 416 с.
17. Морозов В.С., Морозов Е.В., Вихрова С.В. Остаточное содержание влаги в воздухе, осушенном силикагелем // Технические газы. – 2005. – № 6. – С. 34–36.
18. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: в 2 кн. Кн. 1. – М.: Университетская книга: Логос; Физматкнига, 2006. – 912 с.
19. Голдаев С.В., Хушваков А.А. Об использовании силикагелей для повышения долговечности котельного оборудования // Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: Матер. трудов XIX Всерос. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ООО «Скан», 2013. – Т. 2. – С. 386–389.
20. Щегляев А.В. Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин: в 2-х кн. Кн. 2. 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 416 с.
21. Правила технической эксплуатации коммунальных отопительных котельных. Утверждены Приказом Минстроя России от 11.11.92 г. № 251.
22. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.
23. Алексеев В.П., Вайнштейн Г.Е., Герасимов П.В. Расчет и моделирование аппаратов криогенных установок. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 280 с.
24. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. – М.: Машиностроение, 1989. – 367 с.

Поступила 15.04.2014 г.

UDC 620.197

ANALYZING OPTIONS OF MOIST AIR DEHUMIDIFYING WITH SILICA GEL AT CONSERVATION OF UNITS OF STEAM AND WATER TRACT AT THERMAL POWER PLANT

Sergey V. Goldaev,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: SVGoldaev@rambler.ru

Alisher A. Khushvaktov,

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi,
10, Academicians Rajabovs street, Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan.
E-mail: alisher1001@mail.ru

Relevance of the work is determined by the need to protect the steam circuit of TPP units from the parking atmospheric corrosion at inactivity.

The main aim of the study is to carry out the comparative analysis of air dehumidification options in TPP-steam circuit using silica gel, placing it in disposable containers, or using a fluidized bed.

The methods used in the study: based on the tested methods of forecasting the performance of installations for air drying from water vapor by adsorbents the authors evaluated their applicability in the operating conditions in the steam circuit TPP units.

The results: The paper considers the task of conserving TPP units by adsorbents (silica gel, zeolites etc.) widely used when drying and separating gases and liquids at flue gas carbon dioxide removal. As it is noted when maintaining the required moisture in closed volumes the drying occurs in static conditions. Silica gel is humidified at low speed which generally depends on its grain size. Moisture capacity of silica gel at fixed relative gas humidity changes insufficiently. The paper considers as well the variant of configuration of the unit for air drying in steam and water tract of TPP by the absorbent grains in fluidized bed where absorbent particle interact to each other and to inner parts of the device. In industrial absorption units such kind of device with continuous operation is often used. It is efficient when capturing target components from outgoing gas high flows. It was ascertained that in order to reduce from 98 to 20 % relative humidity of air filling the tank with a capacity of 10 m³, one kilo of silica gel with a minimum of technical water capacity of 0,2 is required; it is 25 times less than the value recommended in the rules of technical operation. Similar results were obtained in the framework of the adsorption fluidized bed. The required weight of silica gel is 7...12 kilos for drying moist air at a flow rate corresponding to the adsorption industry. But this scheme is more difficult to be accommodated within the TPP units steam circuit.

Key words:

Adsorption, desorption, air dehumidification, steam and water tract of TPP, fluidized bed, corrosion, silica gel, turbine, regeneration, diffusion, zeolite.

REFERENCES

1. Troyansky E.A., Cholovsky V.N. *Povyshenie dolgovechnosti elementov kotelnogo oborudovaniya* [Increased longevity of boiler equipment elements]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 80 p.
2. Sutotsky G.P. *Povrezhdeniya energeticheskogo oborudovaniya, svyazannye s vodno-khimicheskim rezhimom* [Damages to power equipment associated with water-chemical regime]. S-Peterburg, NPO CKTI Publ., 1992. 256 p.
3. Bogachev A.F. *Predotvrashchenie korrozii i povrezhdeniy oborudovaniya parovodyanogo trakta TES* [Prevention of corrosion and damage equipment steam and water tract TPP]. *Thermal Engineering*, 2001, no. 7, pp. 65–71.
4. Chernyshev E.V., Veprov E.N., Petrov V.A. *Povyshenie korrozionnoy stoykosti oborudovaniya pri ispolzovanii plenkoobrazuyushchikh aminov* [Increased corrosion resistance of equipment using film-forming amines]. *Elektricheskie stantsii*, 2008, no. 11, pp. 15–18.
5. Shatova I.A. *Sovershenstvovanie zashchity ot stoyanochnoy korrozii uglerodistoy stali kotlov na osnove primeneniya inhibitorov oktadetsilamina i M-1*. Kand. Diss. [Improved protection from parking corrosion of boiler carbon steel based on inhibitors of octadecylamine and M-1. Cand. Diss.]. Ivanovo, 2003. 272 p.
6. Polevich A.N. *Razrabotka, issledovanie i vnedrenie protsessov i skhem vozduшной konservatsii teploenergeticheskogo oborudovaniya*. Kand. Diss. [Development, research and implementation of processes and schemes of air conservation of thermal power equipment. Cand. Diss.]. Moscow, 2001. 137 p.
7. Vishnevsky E.P. *Analiz osobennostey ispolzovaniya osnovnykh metodov osusheniya vozdukh* [Analysis of features of using the main dehumidification methods]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie*, 2004, no. 3, pp. 5–8.
8. Vishnevsky E.P., Chepurin G.V. *Konservatsiya osushennym vozdukhom* [Preservation with dry air]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie*, 2010, no. 5, pp. 8–12.
9. White J. *CFD Simulation of silica gel and water adsorbent beds used in adsorption cooling system*. PhD. Diss. Birmingham, 2012. 210 p.
10. White J. *Computational fluid dynamics modelling and experimental study on a single silica gel type B. Modelling and Simulation in Engineering*. 2012, vol. 2012, Article ID 598479, pp. 130–139.
11. Kierzkowska A.M., Pacciani R., Müller C.R. *CaO-based CO₂ sorbents: From fundamentals to the development of new, highly effective materials*. *ChemSusChem*, 2013, vol. 6, Iss. 7, pp. 1130–1148.
12. Freni A., Maggio G., Cipiti F., Aristov Y.I. *Simulation of water sorption dynamics in adsorption chillers: One, two and four layers of loose silicagrain*. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 44, pp. 69–77.
13. Wang D.C., Xia Z.Z., Wu J.Y., Wang R.Z., Zhai H., Dou W.D. *Study of a novel silica gel–water adsorption chiller. Part I. Design and performance prediction*. *International Journal of Refrigeration*, 2005, no. 28, pp. 1073–1083.
14. Ostrikov A.N. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Processes and devices of food manufactures]. S-Peterburg, GIORD Publ., 2007. 608 p.

15. *Obzor rynka silikagelya v SNG* [Overview of silica market in the CIS]. Available at: <http://www.infomine.ru/research/18/441/> (accessed 15 November 2013).
16. Serpionova E.N. *Promyshlennaya adsorbtsiya gazov i parov* [Industrial adsorption of gases and vapors]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1969. 416 p.
17. Morozov V.S., Morozov E.V., Vikhrova S.V. Ostatochnoe sodержание vlagi v vozdukh, osushennom silikagelem [Residual moisture content in the air dried with silica gel]. *Tekhnicheskie gazy*, 2005, no. 6, pp. 34–36.
18. Aynshteyn V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A. *Obshchy kurs protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [General course of processes and devices of chemical technology]. Moscow, Fizmatkniga Publ., 2006. 912 p.
19. Goldaev S.V., Khushvaktov A.A. Ob ispolzovanii silikageley dlya povysheniya dolgovechnosti kotelnogo oborudovaniya [On use of silica gel to improve durability of the boiler equipment]. *Energetika: effektivnost, nadezhnost, bezopasnost: materialy trudov XIX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Energy: Efficiency, reliability, safety. Proc. XIX All-Russian scientific and technical conference]. Tomsk, 2013. Vol. 2, pp. 386–389.
20. Shcheglyayev A.V. *Parovye turbiny. Teoriya teplovogo protsessa i konstruktssii* [Steam turbine. The theory of thermal process and turbine design]. Moscow, Energatomizdat Publ., 1993. 416 p.
21. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii kommunalnykh otopitelnykh kotelnykh*. Utverzhdeny Prikazom Ministroya Rossii [Rules of technical operation of municipal heating plants. Approved by the Order of Russian Ministry of Construction]. 11.11.92, no. 251.
22. Romankov P.G., Frolov V.F. *Massoobmennyye protsessy khimicheskoy tekhnologii* [Mass transfer processes of chemical technology]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 384 p.
23. Alekseev V.P., Vaynshteyn G.E., Gerasimov P.V. *Raschet i modelirovaniye apparatov kriogennykh ustanovok* [Calculation and simulation of cryogenic devices]. Leningrad, Energatomizdat Publ., 1987. 280 p.
24. Bazhan P.I., Seliverstov V.M. *Spravochnik po teploobmennym apparatam* [Handbook of heat transfer devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 367 p.

Received: 15 April 2014.