

УДК 662.995

*Сухой К.М., Коломиец Е.В., Сухая И.В., Беляновская Е.А.***АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
АДСОРБЦИОННОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ
ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ОТОПЛЕНИЯ****ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр**

Работа посвящена построению эффективного алгоритма решения задачи расчета эксплуатационных характеристик адсорбционного аккумулятора тепловой энергии для системы децентрализованного отопления. Предлагается следующий порядок расчета: вычисление коэффициента массопередачи, величины адсорбции, полезной теплоты адсорбции, определение затрат теплоты на процесс, которые включают затраты теплоты для нагрева адсорбента, корпуса установки, воды в баке, испарение воды в баке, нагревание адсорбированной воды и десорбцию, а также вычисление коэффициента полезного действия. Изучены эксплуатационные характеристики теплового аккумулятора закрытого типа при использовании композитного адсорбента «силикагель/сульфат натрия». Влияние скорости паровоздушного потока на коэффициент полезного действия учтено путем введения коэффициента, равного величине адсорбции. Установлено повышение коэффициента полезного действия при повышении скорости движения и относительной влажности паровоздушной смеси. Показано, что температура паровоздушной смеси практически не влияет на его величину. Пользуясь предложенным алгоритмом, выявлены оптимальные эксплуатационные характеристики адсорбционного теплового аккумулятора закрытого типа на основе композитного сорбента «силикагель – сульфат натрия» для системы отопления частного дома (скорость паровоздушной смеси 0,6–0,8 м/с и относительная влажность 40–60%), при которых коэффициент полезного действия достигает максимальных значений (около 55%).

Ключевые слова: адсорбционный аккумулятор тепловой энергии, коэффициент полезного действия, адсорбция, композитный адсорбент, коэффициент массопередачи.

Постановка проблемы

Монотонный рост стоимости первичного топлива и как следствие услуг централизованного отопления обуславливает более широкое применение нетрадиционных источников энергии и активный переход потребителей к системам децентрализованного теплоснабжения. Однако, эксплуатация нетрадиционных источников энергии существенно ограничена неравномерностью поступления в течение дня, изменчивостью метеорологических условий, несогласованностью периодов максимальной выработки тепла и его потребления. В этих условиях становится актуальной разработка эффективных аккумуляторов низкопотенциальной тепловой энергии, наиболее перспективными из которых являются сорбционные тепловые аккумуляторы.

Анализ последних исследований и публикаций

Адсорбционные материалы десятилетиями рассматривались, как перспективные для аккумуляции низкопотенциального тепла [1]. Основные принципы моделирования и оптимизации циклических адсорбционных процессов представлены в работах Лукина [2]. Тем не менее, оценка рабочих характеристик теплоаккумулирующих устройств и выбор их оптимальных конструкции и рабочих параметров предполагает проведение многофакторных экспериментов тепломассопереноса в данных средах, которые связаны с большими материальными затратами. Поэтому разработка алгоритма расчета эксплуатационных характеристик адсорбционных теплоаккумулирующих устройств приобретает первоочередное значение.

© Андреев П.Ю., Потапенко Е.В., І.П. Ісаєнко І.П., 2017

Формулирование цели исследования

Согласно [2] система дифференциальных уравнений, которые описывают внутреннюю диффузионную кинетику адсорбции при практически мгновенном установлении равновесия между концентрацией адсорбата в газе, который заполняет поры и его концентрацией в адсорбированном состоянии включает:

1. Уравнение материального баланса:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{\eta^K} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D \cdot \eta^K \frac{\partial c}{\partial \eta} \right).$$

2. Уравнение изотермы адсорбции:

$$a = f(c).$$

3. Начальные условия:

$$a(\eta, 0) = c(\eta, 0) = 0.$$

4. Граничные условия:

$$c(R, t) = c_0, \left[\eta^K \cdot \frac{\partial c}{\partial \eta} \right]_{\eta \rightarrow 0} = 0.$$

Здесь a и c – концентрация адсорбата в подвижной и неподвижной фазах; $\eta = x$ при параметре формы зерна $K = 0$ – для призматического или цилиндрического зерна длиной $2R$, боковые поверхности которого непроницаемы (пластина); $\eta = r$ – радиальная координата для цилиндрического зерна с непроницаемыми торцами ($K = 1$) или сферического зерна ($K = 2$); t – время; D – эффективный коэффициент диффузии. Насыщение происходит с внешней поверхности гранулы, где поддерживается постоянная концентрация $c = c_0$.

Примем, что в начальные моменты времени зерно не содержит адсорбата, а коэффициент диффузии $D = const$.

Необходимо выбрать эксплуатационные параметры, при которых коэффициент полезного действия теплового аккумулятора является максимальным. На рис. 1 приводится схема алгоритма расчета коэффициента полезного действия теплового аккумулятора.

На рис. 2 представлена конструкция адсорбционного теплового аккумулятора закрытого типа [3].

Процесс эксплуатации адсорбционного теплового аккумулятора реализуется в 4 этапа.

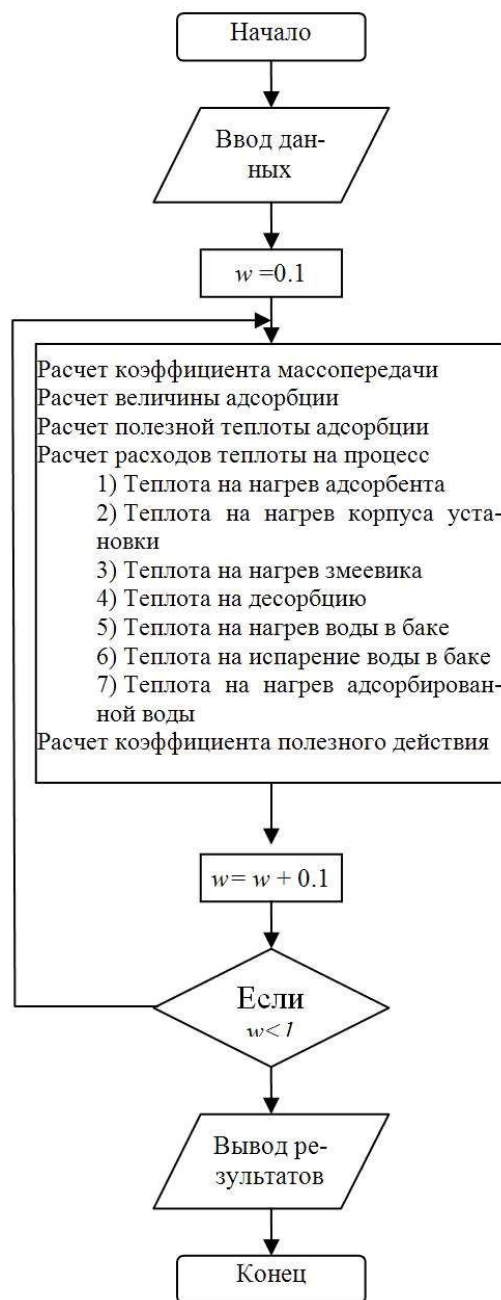


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета коэффициента полезного действия сорбционного теплового аккумулятора

На первом этапе происходит прогрев адсорбента (теплоаккумулирующего материала) от температуры окружающей среды до температуры начала адсорбции. На втором этапе происходит адсорбция водяного пара. На третьем – происходит нагрев композитного материала до температуры регенерации и его регенерация – десорбция воды. И на четвертом – происходит охлаждение композитного материала до температуры начала адсорбции.

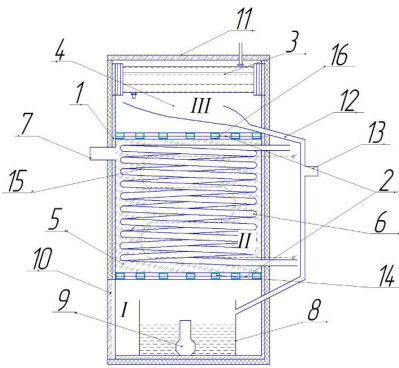


Рис. 2. Конструкция сорбционного теплового аккумулятора:
 1 – теплоизолированный корпус; 2 – сетчатые перегородки;
 3 – конденсатор; 4 – тарелка для сбора конденсата;
 5 – адсорбционно-десорбционный реактор; 6 – змеевик;
 7 – патрубок; 8 – бак с водой; 9 – испаритель;
 10, 11 – крышки; 12 – труба; 13 – патрубок;
 14 – стальные жалюзи; 15 – резистивный нагревательный элемент; 16 – стальные жалюзи

Учитывая эти стадии, коэффициент полезного действия (КПД) рассчитывали, как, %:

$$КПД = \frac{Q_n}{Q_3} \cdot 100, \tag{1}$$

где Q_n – полезная теплота адсорбции, кДж:

$$Q_n = M_{сорб} \cdot \Delta H_{сор}, \tag{2}$$

где $M_{сорб}$ – масса сорбента, кг; $\Delta H_{сор}$ – теплота сорбции, кДж/кг; Q_3 – затраты теплоты, кДж:

$$Q_3 = Q_{сорб} + Q_{кор} + Q_{зм} + Q_{нагр} + Q_{исп}^{воды} + Q_{дес} + Q_{сор}^{воды}, \tag{3}$$

где $Q_{комп}$, $Q_{кор}$, $Q_{зм}$, $Q_{дес}$, $Q_{нагр}$, $Q_{исп}^{воды}$, $Q_{сор}^{воды}$ – соответственно, на каждой из стадий, затраты теплоты для нагрева композита, корпуса установки, композита, воды в баке, испарение воды в баке, нагревание адсорбированной воды, кДж.

Количество теплоты, необходимое для нагревания материала и деталей устройства рассчитывали по общеизвестной формуле

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta t. \tag{4}$$

Воздействие скорости движения паровоз-

душной смеси на коэффициент полезного действия учтен введением в расчет коэффициента A , который показывает величину адсорбции, кг/кг. Этот коэффициент использовали при расчете расхода теплоты на десорбцию:

$$Q_{дес} = \Delta H_{дес} \cdot M_{ком} \cdot A \tag{5}$$

и на нагрев адсорбированной воды:

$$Q_{сор}^{воды} = M_{сорб} \cdot A \cdot C_v \cdot (t_{рег} - t_{н.с.}), \tag{6}$$

где $\Delta H_{дес} = 2850$ – теплота десорбции, кДж/кг.

$$A = \frac{C_0 - C}{M_{ком}} \cdot V_{возд} \tag{7}$$

где $V_{нов}$ – объем воздуха: $V_{нов} = F_{адс} \cdot w \cdot \tau$, м³; w – скорость паровоздушной смеси, м/с; $F_{адс}$ – площадь сечения теплового аккумулятора, м²; C – концентрация паровоздушной смеси на выходе из теплового аккумулятора [4]:

$$C = \frac{C_0}{\frac{\beta \cdot (-\tau \cdot w \cdot C_0) + H}{a} \cdot e^{\frac{-\tau \cdot w \cdot C_0}{a}} + 1}, \tag{8}$$

где τ – продолжительность адсорбции, с; C_0 – концентрация паровоздушной смеси на входе в тепловой аккумулятор, кг/кг; H – высота теплового аккумулятора, м; a – сорбционная емкость материала, кг/кг; β – коэффициент массопередачи, определенный по зависимости [5]:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{1}{\beta_n} + \frac{1}{\beta_{пр}}, \tag{9}$$

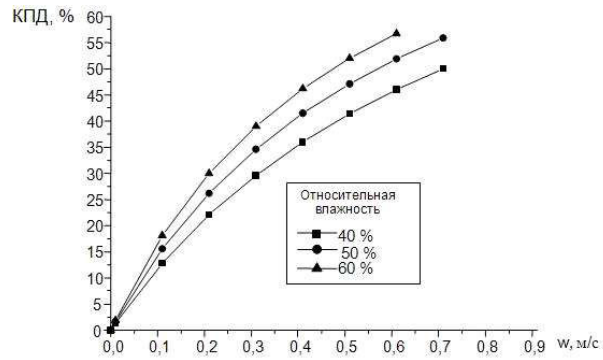
где β_y , β_n и $\beta_{пр}$ – коэффициенты массоотдачи в газовой фазе, в порах и продольного перемешивания [5].

Изложение основного материала исследования

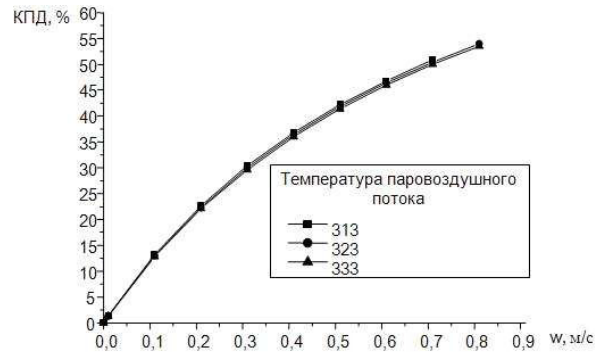
На рис. 3 и 4 представлены зависимости коэффициента полезного действия от скорости паровоздушного потока, рассчитанные по формулам (1)–(9).

В качестве теплоаккумулирующего материала использован композитный адсорбент «силикагель/Na₂SO₄», основные характеристики которого приведены в [6].

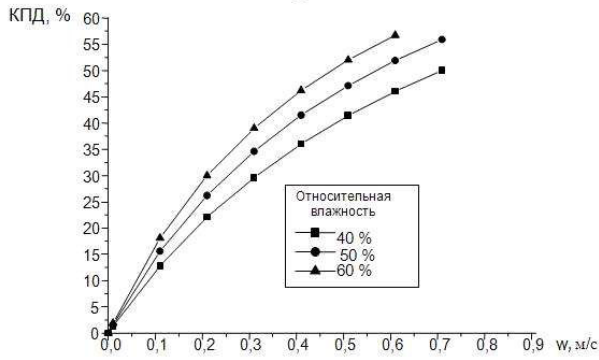
Повышение скорости движения и относительной влажности паровоздушной смеси сопровождается ростом коэффициента полезного дей-



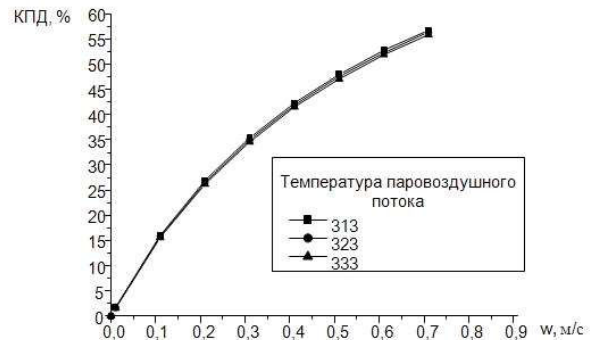
а



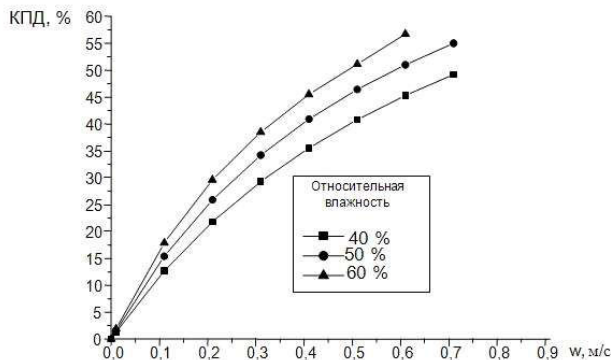
а



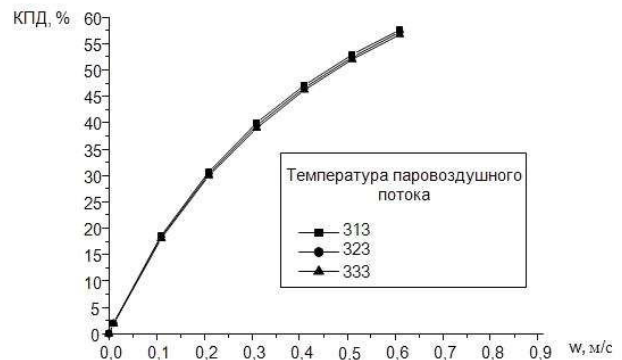
б



б



в



в

Рис. 3. Влияние скорости паровоздушного потока при относительной влажности 40–60%: а) температура регенерации 80°C; б) температура регенерации 90°C; в) температура регенерации 100°C

Рис. 4. Влияние температуры паровоздушной смеси (относительная влажность 40% (а), 50% (б) и 60% (в)) на коэффициент полезного действия теплового аккумулятора

ствия. Температура паровоздушной смеси практически не влияет на его величину. Максимальные значения КПД (около 55%) наблюдаются при относительной влажности 40–60% при скоростях паровоздушной смеси 0,6–0,8 м/с.

Выводы

Разработан алгоритм расчета коэффициента полезного действия адсорбционного теплового аккумулятора закрытого типа для систем децентрализованного отопления. Предложенный алгоритм расчета эксплуатационных характеристик

адсорбционного теплового аккумулятора позволяет установить оптимальные эксплуатационные характеристики адсорбционного теплового аккумулятора для системы отопления частного дома.

Работа выполнена при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований (номер государственной регистрации 0116U001489).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Comparison of the thermal performance of a solar heating system with open and closed solid sorption storage* / Bertsch F., Dagmar J., Asenbeck S. and others // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol.48. – P.280-289.

2. Лукин В.Д., Новосельский А.В. Циклические адсорбционные процессы: Теория и расчет. – Л.: Химия, 1989. – 256 с.

3. Пат. 83436 А Україна, МПК F 24 Н 7/00. Тепловий акумулятор // Сухий К.М., Сухий М.П., Беяновська О.А., Козлов Я.М., Коломієць О.В. (Україна); заявник та патентовласник ДВНЗ УДХТУ. – № u 2013 03474; Заявл. 21.03.13; Опубл. 10.09.2013. Бюл. № 17. – 5 с.

4. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Уч. пособие для вузов; под ред. чл.-кор. АН СССР П.Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

5. Математическое моделирование и управление процессом короткоциклового безнагревной адсорбции / В.Г. Матвейкин, В.А. Погонин, С.Б. Путин, С.А. Скворцов. – М.: Изд-во Машиностроение-1, 2007. – 140 с.

6. *Structure and Adsorption Properties of the Composites ‘Silica Gel – Sodium Sulphate’, obtained by Sol – Gel Method* / Kostyantyn M. Sukhyu, Elena A. Belyanovskaya, Yaroslav N. Kozlov, Elena V. Kolomyets, Mikhaylo P. Sukhyu. // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol.64. – № 1-2. – P.408-412.

Поступила в редакцію 31.10.2016
Рецензент: д.т.н., проф. Черваков О.В.

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АДСОРБЦІЙНОГО АКУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СИСТЕМИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ОПАЛЕННЯ

Сухий К.М., Коломієць О.В., Суха І.В., Беяновська О.А.

Робота присвячена побудові ефективного алгоритму розв'язання задачі розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного акумулятора теплової енергії для системи децентралізованого опалення. Пропонується наступний порядок розрахунку: обчислення коефіцієнта масопередачі, величини адсорбції, корисної теплоти адсорбції, визначення витрат теплоти на процес, які включають витрати теплоти для нагріву адсорбенту, корпусу установки, води в баку, випаровування води в баку, нагрівання адсорбованої води і десорбцію, а також обчислення коефіцієнта корисної дії. Вивчено експлуатаційні характеристики теплового акумулятора закритого типу при використанні композитного адсорбенту «силікагель/натрій сульфат». Вплив швидкості пароповітряного потоку на коефіцієнт корисної дії враховано шляхом введення коефіцієнта, рівного величині адсорбції. Встановлено підвищення коефіцієнта корисної дії при підвищенні швидкості руху і відносної вологості пароповітряної суміші. Показано, що температура пароповітряної суміші практично не впливає на його величину. Користуючись запропонованим алгоритмом, виявлені оптимальні експлуатаційні характеристики адсорбційного теплового акумулятора закритого типу на основі композитного сорбенту «силікагель – сульфат натрію» для системи опалення приватного будинку (швидкість пароповітряної суміші 0,6–0,8 м/с і відносна вологість 40–60%), при яких коефіцієнт корисної дії досягає максимальних значень (близько 55%).

Ключові слова: адсорбційний акумулятор теплової енергії, коефіцієнт корисної дії, адсорбція, композитний адсорбент, коефіцієнт масопередачі.

CALCULATION ALGORITHM OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ADSORPTIVE HEAT STORAGE DEVICE FOR DECENTRALIZED SPACE HEATING SYSTEM

Sukhyu K.M., Kolomyets E.V., Sukha I.V., Belyanovskaya E.A.

The work is devoted to the development of an efficient algorithm for solving the problem of calculating the operating characteristics of an adsorption heat energy storage device for a decentralized space heating system. The following calculation procedure is proposed: calculation of the mass transfer coefficient, adsorption amount, useful heat of adsorption, determination of the heat input, it being calculated as heat inputs for heating the adsorbent, device housing, water in the tank, evaporation of water in the tank, heating of the adsorbed water and desorption. Then coefficient of efficiency is calculated. The operating characteristics of a closed-type heat energy storage were studied when the composite adsorbent «silica gel/sodium sulfate» used. The effect of the steam-air flow rate on the efficiency is taken into account by introducing a coefficient equal to the value of the adsorption. An increase in the efficiency coefficient was stated with an increase of the speed of movement and relative humidity of the vapor-air mixture. It is shown that the vapor-air flow temperature practically does not affect its value. Having been used the suggested algorithm, the optimal operating characteristics of an adsorption heat storage device of a closed type based on a composite sorbent «silica gel-sodium sulfate» for a private house heating system are revealed to be air-gas mixture velocities 0.6-0.8 m/s and relative humidity 40-60%. When these operational data applied, the efficiency coefficient is shown to reach the maximum values (about 55 %).

Keywords: heat energy storage device, coefficient of efficiency, adsorption, composite adsorbent, mass transfer coefficient.