

Научная статья
УДК.574.56:620.92
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-1-90-98>

Моделирование работы термотрансформаторов циклического действия

Михаил Федорович Руденко^{1✉}, Юлия Викторовна Шипулина²,
Александра Михайловна Руденко³

¹⁻³Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, mf.rudenko@mail.ru

Аннотация. Проведено моделирование и проанализирована эффективность работы гелиоэнергетических термотрансформаторов адсорбционного типа циклического действия на основании программы, разработанной в программном пакете MATLAB. Термотрансформатор работает на энергии солнечной радиации и механической энергии перепада давлений в аппаратах в процессе суточного изменения температуры окружающей среды. В основе программы – упрощенный термодинамический цикл работы термотрансформатора, состоящий из следующих процессов: изостерического нагрева и охлаждения, десорбции и адсорбции, конденсации и кипения. Алгоритм программы состоит из двух расчетных блоков, позволяющих рассчитать максимальную тепловую эксергию, подводимую к термотрансформатору в дневное время при обогреве генератора энергией солнечной радиации, и минимальную эксергию, отводимую от термотрансформатора в ночное время из испарителя, когда производится полезная работа охлаждения. На основании расчетных характеристик рабочих пар термотрансформаторов (активированный уголь (АС) – аммиак, АС – метиламин и АС – этиламин) получены зависимости эксергетических коэффициентов в зависимости от изменения основных температурных характеристик термодинамического цикла. Адсорбционная способность рабочих пар определялась по структурным уравнениям Дубинина–Радускевича. Системный анализ моделирования позволил получить качественные и количественные оценки степени термодинамического совершенства работы термотрансформаторов циклического действия на различных рабочих парах и определить области их применения. Разработанная программа позволяет проводить системный анализ работы термотрансформаторов циклического действия в части определения диапазона и параметров эффективности его термодинамического совершенства. Программа позволяет исследовать характер зависимостей коэффициентов адсорбционной способности различных адсорбатов с разными сорбентами при различных температурных условиях. Программа позволяет исследовать зависимости термодинамических коэффициентов различных термотрансформаторов циклического действия на разных рабочих парах от температур адсорбции, конденсации и окружающей среды. Программный анализ показал, что степень термодинамического совершенства в термотрансформаторе циклического действия на рабочей паре АС–аммиак выше, чем на рабочих парах АС–метиламин и АС–этиламин, показатели значений давления в установках у последних пар в 2–2,5 ниже, а у последней рабочей пары приближаются к атмосферному.

Ключевые слова: термотрансформатор, рабочие пары, генератор, испаритель, теплота, адсорбция, адсорбент, эксергетический коэффициент

Для цитирования: Руденко М. Ф., Шипулина Ю. В., Руденко А. М. Моделирование работы термотрансформаторов циклического действия // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 1. С. 90–98. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-1-90-98>.

Original article

Modeling cyclic thermotransformer operation

Michael F. Rudenko¹, Julia V. Shipulina², Aleksandra M. Rudenko³

¹⁻³Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian, mf.rudenko@mail.ru

Abstract. The article is focused on modeling a solar powered adsorption thermotransformer and analyzing the efficiency of its cyclic operation on the basis of the program developed in the Matlab software package. The thermotransformer uses the energy of solar radiation and the mechanical energy of pressure drop in the apparatus in the process of daily changes in ambient temperatures. The program is based on a simplified thermodynamic cycle of the thermotransformer built in the Klaperton diagram and consisting of the following processes: isosteric heating and cooling, desorption and adsorption, condensation and boiling. The program algorithm consists of two computational blocks, which help calculate the maximum thermal exergy supplied to the thermotransformer in the daytime heated by the energy of solar radiation from the generator and the minimum exergy removed from the thermotransformer at night

from the evaporator, when useful cooling work is performed. Using the calculated characteristics of the operating couples of thermal transformers (activated carbon (AC) - ammonia, AC - methylamine and AC – ethylamine) the dependences of exergy coefficients were obtained relatively to the changes in the main temperature characteristics of the thermodynamic cycle. The adsorption capacity of the working couples was determined by the Dubinin-Radushkevich's structural equations. The system analysis of modeling made it possible to obtain qualitative and quantitative assessments of thermodynamic perfection of the cyclic thermotransformers' operation at different working couples and to determine their application areas. The developed program makes it possible to carry out a system analysis of the cyclic thermotransformers' operation in the part of determining the range and parameters of efficiency of its thermodynamic perfection. The program allows studying the nature of the dependences of the coefficients of the adsorption capacity of different adsorbates with different sorbents in different temperature conditions. The program helps investigate the dependences of the thermodynamic coefficients of various cyclic thermal transformers on dispersed working vapors on the temperatures of adsorption, condensation and environment. The software analysis showed that the degree of thermodynamic perfection in the cyclic thermal transformer on the AC-ammonia working couple is higher than on the AC-methylamine and AC-ethylamine working couples, the pressure values in the installations for the latter couples are 2-2.5 times lower, and the last working couple is approaching atmospheric.

Keywords: thermotransformer, working couples, generator, evaporator, heat, adsorption, adsorbent, exergy coefficient

For citation: Rudenko M. F., Shipulina J. V., Rudenko A. M. Modeling cyclic thermotransformer operation. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics.* 2022;1:90-98. (In-Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-1-90-98>.

Введение

Термотрансформаторы циклического действия находят все более активное применение в качестве холодильников и охлаждающих устройств в жарких регионах для хранения медикаментов, вакцин, пищевых продуктов, воды и т. п. Разработкой таких устройств занимаются многие ученые во многих странах: во Франции, Китае, Египте, Португалии, США, России и др. странах (М. М. Дубинин, А. М. Архаров, М. Дюпонт, Л. В. Ванг, А. А. Абдель Азиз и др. [1–4]). Внедрение таких холодильников в промышленности и быту позволит не только улучшить условия жизни населения жарких регионов, но и значительно экономить электроэнергию на производство холода. Особенно это актуально в южных регионах с высокой интенсивностью солнечной радиации и большим количеством солнечных дней, а также в точках, далеких от линий электропередач, т. к. такие термотрансформаторы способны работать автономно, от солнечной энергии. Такими точками могут быть наблюдательные пункты, расположенные на островах, поселки нефтяников и газовиков, пункты для питья в пустынных районах. Эффективность работы термотрансформаторов зависит как от их конструктивных особенностей, так и от рабочей пары веществ, участвующей в термодинамическом цикле установки за счет осуществления физико-химических преобразований, происходящих вследствие периодической подачи солнечной энергии днем и суточных температурных перепадов окружающего воздуха. Наиболее распространены в адсорбционных термотрансформаторах рабочие пары AC (активный уголь) – аммиак, и AC–метанол. Поиск новых рабочих пар, повышающих эффективность эксплуатации термотрансформаторов, при помощи моделирования является актуальной задачей.

Объектом исследования данной работы являются гелиоэнергетические термотрансформаторы, предметом исследования – повышение эффективности их работы.

Целью работы является исследование по разработанной модели эксергетических коэффициентов полезного действия термотрансформатора на новых рабочих парах.

Данная цель достигается путем решения следующих задач:

- разработки алгоритма исследования эффективности работы термотрансформатора по эксергетическим коэффициентам полезного действия;
- разработки модели работы гелиоэнергетического термотрансформатора;
- проведения расчетов по модели в программном обеспечении Matlab.

Данное исследование ограничивается изучением работы термотрансформатора на трех рабочих парах: AC–аммиак, AC–метиламин, AC–этиламин.

Работа термотрансформатора по модели осуществляется дискретно с задаваемым периодом времени, при подаче теплоты на генератор и отводе теплоты из испарителя.

Принцип действия термотрансформатора

В основе работы термотрансформаторов периодического действия лежат физические процессы адсорбции, связанные со способностью некоторых веществ (адсорбентов) при охлаждении поглощать пары других (адсорбатов), а при нагреве выделять из сорбентов адсорбаты. Циклическое действие возможно, если подача тепловой энергии и охлаждающей осуществляется периодически, постоянно во времени. Это свойственно установкам адсорбционного типа, работающим от энергии солнечной радиации и разности перепада температур [5, 6].

Термотрансформатор циклического действия, работающий от энергии солнечной радиации, показан на рис. 1.

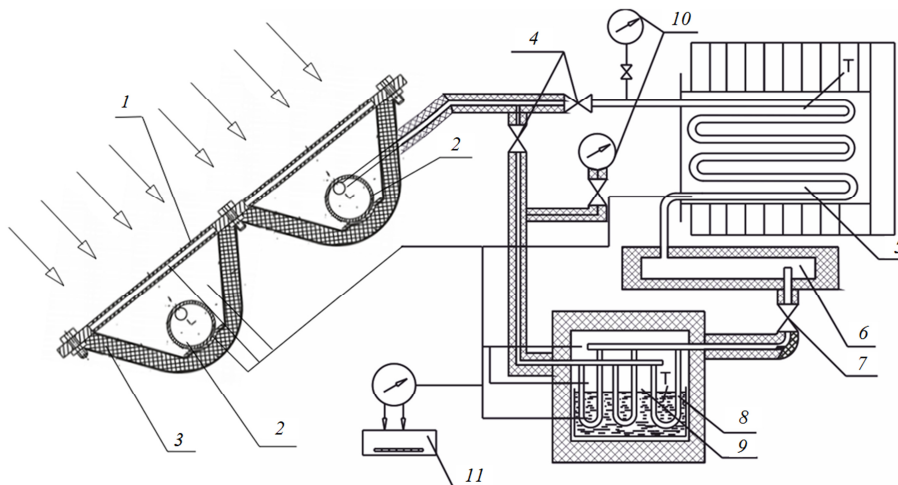


Рис. 1. Термотрансформатор циклического действия: 1 – генератор-адсорбер; 2 – реакторы; 3 – гелиоприемные устройства типа «горячий ящик»; 4 – обратные клапаны; 5 – конденсатор; 6 – ресивер; 7 – дроссельный вентиль; 8 – испаритель; 9 – камера охлаждения; 10 – манометры; 11 – цифровой вольтметр

Fig. 1. Cyclichthermotransformer: 1 – adsorber generator; 2 – reactors; 3 – hot box type solar receivers; 4 – check valves; 5 – capacitor; 6 – receiver; 7 – throttle valve; 8 – evaporator; 9 – cooling chamber; 10 – manometers; 11 – digital voltmeter

Солнечная энергия, попадая в гелиоприемное устройство 3 через прозрачное покрытие, в котором солнечные лучи отражаются от зеркальных стенок, нагревает реакторы 2. В реакторах находится насыщенный адсорбатом сорбент, последний нагревается до высокой температуры, и из него начинают выпариваться пары адсорбата. Адсорбат через обратный клапан 4 поступает в конденсатор 5, где сжижается, отдавая тепло воде, и накапливается в ресивере 6, охлаждаясь до температуры окружающего воздуха. Этот период работы термотрансформатора называется регенерация, а процесс выделения адсорбата из сорбента – десорбцией.

После захода солнца и до утра начинается период зарядки, насыщение сорбента адсорбатом в процессе отвода теплоты от реакторов. Вечером охлажденный адсорбат через дроссельный вентиль 7 перепускается в испаритель 8, где при пониженном давлении начинает кипеть и забирать теплоту

из охлаждаемой камеры 9. Пары адсорбата через обратный клапан 4 поглощаются сорбентом, находящимся в реакторах. Процесс поглощения, кипения адсорбата в испарителе и охлаждения продолжается до утра.

Утром после восхода солнца период регенерации начинается снова.

Постановка задачи

В основе моделирования термотрансформатора лежит анализ теоретического термодинамического цикла его работы [7]. Цикл состоит из 4 процессов, протекающих в реакторе генератора-адсорбера установки: А–Б – изостерический нагрев, Б–В – десорбция, В–Д – изостерическое охлаждение, Д–А – адсорбция – и 2 процессов: Г – конденсация адсорбата в конденсаторе и Ж – кипение жидкого адсорбата в испарителе (рис. 2).

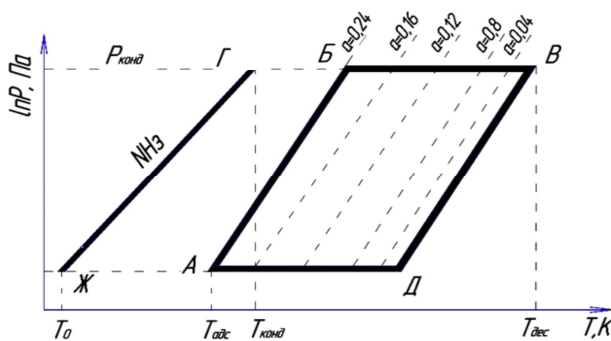


Рис. 2. Упрощенная схема термодинамического цикла работы термотрансформатора

Fig. 2. Simplified diagram of thermodynamic cycle of thermotransformer operation

Процесс А–Б протекает утром, при обогреве генератора теплом солнечной радиации, для него характерно повышение температуры насыщенного сорбента, при этом адсорбат связан с сорбентом и не происходит его отделения. По мере интенсивного нагрева реактора энергия адсорбата повышается и он в парообразном состоянии отделяется от сорбента (процесс Б–В) и направляется в конденсатор, где происходит его сжижение в процессе конденсации (Г) при высоком давлении. Эти процессы длятся до захода солнца, пока интенсивность энергии солнечной радиации высокая.

После уменьшения и затем полного прекращения поступления энергии солнца, снижения температуры воздуха начинается процесс охлаждения, прекращается выделение адсорбата из реактора, и сухой сорбент начинает остывать – происходит процесс В–Д.

С некоторой задержкой во времени, после снижения давления в реакторе, начинается процесс Ж – кипения.

Необходимо разработать модель гелиоэнергетического термотрансформатора, позволяющую

определять степень термодинамического совершенства подобных установок при помощи эксергетического коэффициента.

Методы исследования

Для определения эффективности работы адсорбционного трансформатора циклического действия анализируем процессы нагрева (изостерический нагрев и десорбция), при котором подводится энергия к установке, и процесс Ж (кипения), где происходит полезный охлаждающий эффект при кипении адсорбата в испарителе.

Базовой составляющей модели гелиоэнергетического термотрансформатора является уравнение Дубинина–Радушкевича, ранее рассмотренное в работах [8, 9]. Модель является универсальной, позволяет в автоматическом режиме анализировать эффективность работы термотрансформаторов с различными рабочими парами, манипулировать вспомогательными командами.

Алгоритм расчетной программной модели представлен на рис. 3.

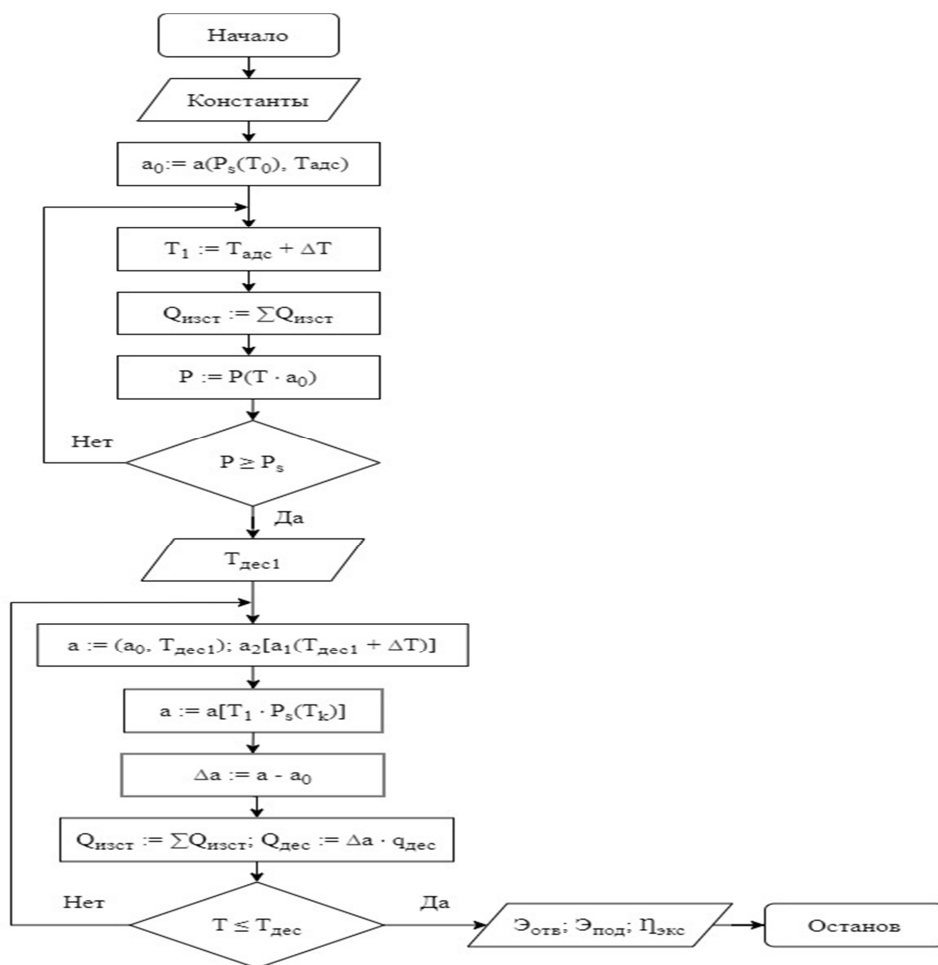


Рис. 3. Алгоритм программной модели эффективности работы термотрансформатора

Fig. 3. Algorithm of the software model of the efficiency of the thermal transformer

В основе программной модели лежат следующие логические рассуждения.

1. Сначала рассматривается изостерический процесс нагрева А–Б, при котором адсорбционная способность рабочей пары не изменяется, $a(T_{\text{адс}}, P_s) = \text{const}$, и определяется по уравнению Дубинина–Радушкевича

$$a_0(P, T) = \rho(T) \cdot W_0 \cdot \exp\{-D \cdot [T \cdot \ln\left(\frac{P_s}{P}\right)]^n\},$$

где $a_0(P, T)$ – отношение массы адсорбата к сорбенту при равновесном отношении давлений (P/P_s) и текущей абсолютной температуры T , кг/кг; W_0 – удельный максимальный объем адсорбционного пространства сорбента, м³/кг; $\rho_s(T)$ – удельная плотность адсорбата при текущей температуре, кг/м³; P_s – давление при температуре насыщения в испарителе при T_0 , Па; P – текущее давление процесса, Па; D – степень энергии адсорбционной способности рабочей пары сорбент/адсорбат; n – коэффициент равномерности распределения пор в сорбенте.

При этом в реакторе повышаются температура насыщенного сорбента и давление. На этом участке расчеты ведем при начальной температуре $T_{\text{адс}}$ и давлении $P_{\text{адс}}$ и затем, задаваясь определенным приращением температуры $T_1 = T_{\text{адс}} + \Delta T$, определяем по уравнению состояния системы новое давление P_1 , выведенное из уравнения Дубинина–Радушкевича:

$$P_1 = P_s / \exp\left\{\ln\left[a(P, T) / (W_0 \cdot \rho(T))\right] / (-D \cdot T^n \cdot n)\right\}. \quad (1)$$

2. Затем рассчитываем тепловую нагрузку $Q_{\text{изст}}$ изостерического процесса, Вт:

$$Q_{\text{изст}} = \Sigma Q_i.$$

В процессе А–Б теплота идет не только на нагрев насыщенного сорбента, но и на нагрев элементов конструкции установки, металлических частей, стекла, изоляции и пр.:

$$Q_i = M_i \cdot C_i \cdot \Delta T_i,$$

где M_i (кг), C_i (кДж/кг·К) – масса и теплоемкость соответствующих элементов; ΔT_i – приращение температуры, К.

3. Затем проверяем расчетное по формуле (1) давление P_1 на равенство давлению насыщения $P_{s(T_k)}$ при конденсации. Если давления не равны, то принимаем новое приращение температуры $T_2 = T_1 + \Delta T$, снова пересчитываем давление, пока оно не будет $P_2 = P_{s(T_k)}$. Температура, при которой давления совпадают, является температурой начала процесса десорбции $T_{\text{дес1}}$. Модель переходит на новый этап расчета.

Изостерический процесс А–Б прекращается при температуре, соответствующей давлению насыщения. Дальнейший рост температуры не влияет на

давление, оно остается постоянным $P_s = P_{s(T_k)}$, и начинается процесс десорбции Б–В, который характеризуется выделением адсорбата из сорбента, степень насыщения которого уменьшается: $a_0 - a_{01} = \Delta a$. Путем приращения температуры $T_{\text{дес2}} = T_{\text{дес1}} + \Delta T$ получаем новую концентрацию адсорбата в сорбенте $a = f(T, P_{s(T_k)})$.

4. Далее рассчитываем теплоту, идущую на нагрев элементов установки и сорбента, с учетом потери массы адсорбата, и теплоту, идущую на процесс десорбции:

$$Q_{\text{дес}} = \Delta a \cdot q_{\text{дес}},$$

где $q_{\text{дес}}$ – удельная теплота десорбции, необходимая для выхода жидкой фазы адсорбата в газообразную из пористой структуры сорбента, Вт, и равная

$$q_{\text{дес}} = \{r_0 + R \cdot T \cdot \ln(P_s / P) + [\alpha \cdot R \cdot T / (D \cdot n)] [T \cdot \ln(P_s / P)]^{-1}\},$$

где r_0 – скрытая теплота парообразования адсорбата, Дж/кг; R – универсальная газовая постоянная адсорбата, Дж/(кг·К); P_s – давление насыщения; P, T – текущие значения давления и температуры; α – коэффициент термического расширения адсорбционной фазы адсорбата, 1/К.

5. Далее программа сравнивает расчетную температуру процесса десорбции с заданной: $T_{\text{дес}} = T_{\text{дес(max)}}$. При несовпадении значений температуру снова повышают и снова рассчитывают теплоты и потери концентрации адсорбата Δa , которые в конечном результате интегрируются. Процесс десорбции протекает до максимальной заданной температуры $T_{\text{дес(max)}}$.

6. Степень термодинамического совершенства термотрансформатора адсорбционного типа циклического действия определяется через отношение эксергии теплоты, подводимой к гелиоприемной части реактора генератора-адсорбера установки, и эксергии теплоты, отводимой от испарителя охлаждающей камеры [10].

Теплота к гелиоприемной части интегрируется в процессах А–Б и Б–В и состоит из теплоты нагрева элементов конструкции установки и сорбента и теплоты десорбции:

$$Q_{\text{изст}} + Q_{\text{дес}} = (Q_{\text{АБ}} + Q_{\text{БВ}}) + Q_{\text{дес}}.$$

Тогда подводимая эксергия будет равна

$$Э_{\text{под}} = (Q_{\text{АБ}} + Q_{\text{БВ}} + Q_{\text{дес}}) \left[(T_{\text{дес}} - T_{\text{о.с.д}}) / T_{\text{дес}} \right],$$

где $T_{\text{дес}}$ – абсолютная температура десорбции, К; $T_{\text{о.с.д}}$ – абсолютная средняя дневная температура охлаждающей среды, К.

Теплота, отводимая из испарителя в ночное время, Q_0 , равна, Вт:

$$Q_0 = r_0 \cdot \Delta a.$$

Тогда отводимая из установки эксергия будет равна

$$\mathcal{E}_{\text{отв}} = Q_0 \left[(T_{\text{о.с.н}} - T_0) / T_0 \right],$$

где $T_{\text{о.с.н}}$ – абсолютная температура охлаждающей среды в ночное время, К; T_0 – абсолютная температура кипения адсорбата в испарителе, К.

Эксергетический коэффициент степени совершенства $\eta_{\text{экс}}$ термотрансформатора циклического действия будет равен

$$\eta_{\text{экс}} = \mathcal{E}_{\text{отв}} / \mathcal{E}_{\text{под}}.$$

Обсуждение результатов

На основании исследования адсорбционной способности активированных углей российского и зарубежного производства с такими адсорбатами, как

аммиак, метиламин и этиламин, получены усредненные коэффициенты для структурного уравнения Дубинина–Радущкевича, которые затем и использовались в расчетной программе [7]:

– $W_{\text{о(амм)}} = 442,8 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $D_{\text{(амм)}} = 12,17 \cdot 10^{-7}$; $n = 2$ – рабочая пара АС–аммиак;

– $W_{\text{о(мет)}} = 355,2 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $D_{\text{(мет)}} = 16,58 \cdot 10^{-7}$; $n = 2$ – рабочая пара АС–метиламин;

– $W_{\text{о(эtm)}} = 201,2 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $D_{\text{(эtm)}} = 21,17 \cdot 10^{-7}$; $n = 2$ – рабочая пара АС–этиламин.

Для расчетной модельной программы также использовались константы и зависимости (давления насыщения от температуры, плотности адсорбатов от температуры, скрытой теплоты парообразования и т. п.), взятые из справочников [11–13].

На рис. 4 изображены расчетные графики зависимостей эксергетических коэффициентов термотрансформатора циклического действия, работающего на рабочей паре АС–аммиак.

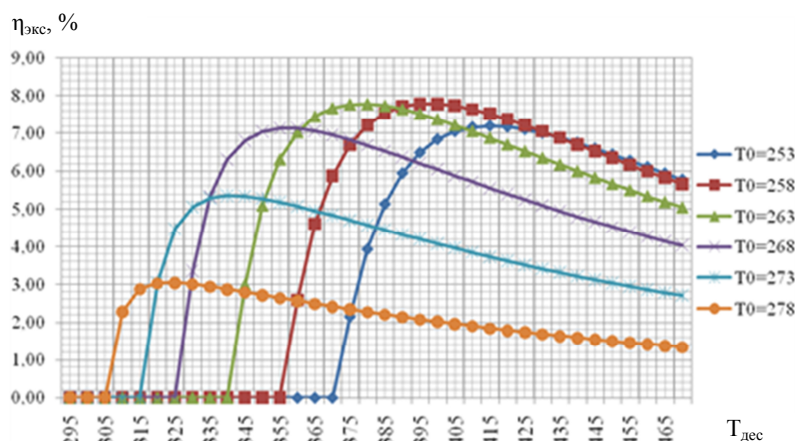


Рис. 4. Графики зависимостей эксергетических коэффициентов рабочей пары АС–аммиак

Fig. 4. Graphs of dependences of exergy coefficients of a working couple АС-ammonia

Расчеты проведены для различных температур десорбции (в диапазоне $T_{\text{дес}}$ от 293 К (+20 °С) до 468 К (+195 °С) рабочей пары в сорбенте и различных температур кипения адсорбата в испарителе (в диапазоне T_0 от 253 К (–20 °С) до 278 К (+5 °С), при постоянных температурах конденсации $T_{\text{к}} = 293$ К (+20 °С), адсорбции $T_{\text{адс}} = 293$ К (+20 °С), окружающей среды $T_{\text{о.с}} = 283$ К (+10 °С).

Из графиков видно, что все зависимости носят следующий характер: сначала эксергетический коэффициент в изостерическом процессе при повышении температуры равен нулю, а затем, начиная с некоторой начальной температуры $T_{\text{дес}}$, наблюдается резкое увеличение коэффициента до максимального значения, и в некотором диапазоне температур десорбции наблюдается самое высокое устойчивое его значение. Затем наблюдается по-

степенное снижение значений эксергетических коэффициентов.

Программа позволяет для рабочей пары АС–аммиак рассчитать рекомендации: при каких температурах кипения адсорбата в испарителе и каких температурах обогрева насыщенного сорбента в генераторе можно получить наилучшую степень термодинамического совершенства гелиоэнергетического термотрансформатора. Судя по приведенным графикам наиболее эффективно гелиоэнергетические термотрансформаторы на рабочей паре АС–аммиак будут работать в режимах замораживания: при температурах T_0 (от –15 до –10 °С) $\eta_{\text{экс}}$ равен 7,86–7,98 %.

На рис. 5 изображены расчетные графики зависимостей эксергетических коэффициентов термотрансформатора циклического действия, работающего на рабочей паре АС–метиламин.

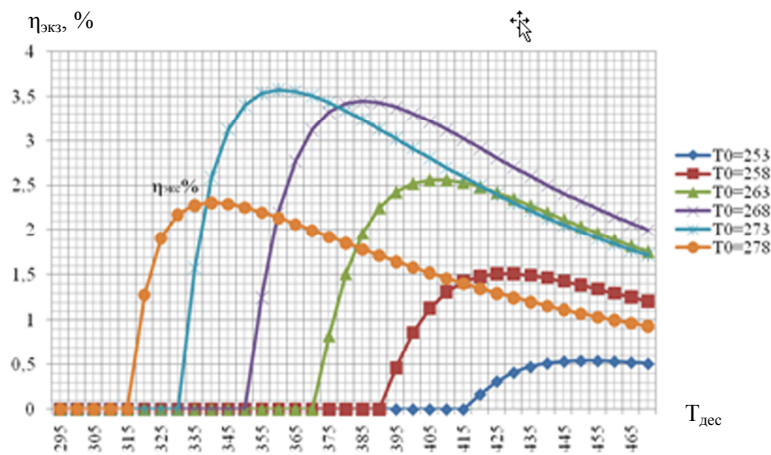


Рис. 5. Графики зависимостей эксергетических коэффициентов рабочей пары АС–метиламин

Fig. 5. Graphs of dependences of exergy coefficients of a working couple AC-methylamine.

Расчеты также проведены для различных температур десорбции (в диапазоне $T_{дес}$ от 293 К (+20 °С) до 468 К (195 °С)) рабочей пары в адсорбенте и различных температур кипения адсорбата в испарителе (в диапазоне T_0 от 253 К (–20 °С) до 278 К (+5 °С)), при постоянных температурах конденсации $T_к = 293$ К (+20 °С), адсорбции $T_{адс} = 293$ К (+20 °С), окружающей среды $T_{о,с} = 283$ К (+10 °С).

Из графиков видно, что все зависимости носят следующий характер: сначала эксергетический коэффициент в изостерическом процессе при повышении температуры равен нулю, а затем, начиная с некоторой начальной температуры $T_{дес}$, наблюдается резкое увеличение коэффициента до максимального значения, и в некотором диапазоне температур десорбции наблюдается самое высокое устойчивое его значение. В отличие от графика на рис. 4 максимальные значения более разбросаны по температурам десорбции. Затем также наблю-

дается постепенное падение значений эксергетических коэффициентов.

Для рабочей пары АС–метиламин рассчитаны рекомендации: при каких температурах кипения адсорбата в испарителе и температурах обогрева насыщенного сорбента в генераторе можно получить наилучшую степень термодинамического совершенства гелиоэнергетического термотрансформатора. Судя по приведенным графикам наиболее эффективно гелиоэнергетические термотрансформаторы на рабочей паре АС–метиламин будут работать в режимах охлаждения и кондиционирования при температурах T_0 (–5 ÷ 0 °С) $\eta_{экс}$ равен 3,48–3,54 %.

На рис. 6 изображены расчетные графики зависимостей эксергетических коэффициентов термотрансформатора циклического действия, работающего на рабочей паре АС–этиламин.

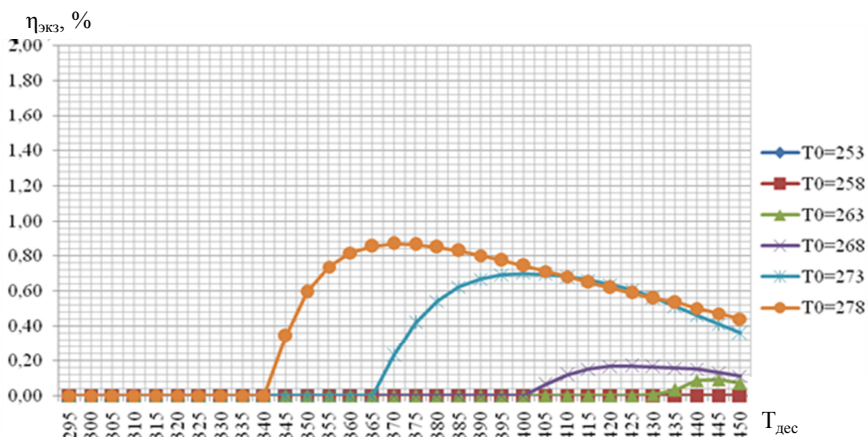


Рис. 6. Графики зависимостей эксергетических коэффициентов рабочей пары АС–этиламин

Fig. 6. Graphs of dependences of exergy coefficients of a working couple AC-ethylamine

Для рис. 6 можно приводить аналогичные рассуждения, что и о рабочих парах, описанных выше. Судя по приведенным графикам наиболее эффективно гелиоэнергетические термотрансформаторы на рабочей паре АС–этиламин будут работать только в режимах кондиционирования: при температурах $T_0(0 \div +5 \text{ }^\circ\text{C}) \eta_{\text{экс}}$ равен 0,69–0,85 %.

Заключение

Разработанная программа позволяет проводить системный анализ работы термотрансформаторов циклического действия по определению диапазона и параметров эффективности его термодинамического совершенства.

Программа позволяет исследовать характер зависимостей коэффициентов адсорбционной способности различных адсорбатов с разными сорбентами при различных температурных условиях.

Программа позволяет исследовать зависимости термодинамических коэффициентов различных термотрансформаторов циклического действия на разных рабочих парах от температур адсорбции, конденсации и окружающей среды.

Несмотря на то, что степень термодинамического совершенства в термотрансформаторе циклического действия на рабочей паре АС–аммиак выше, чем на рабочих парах АС–метиламин и АС–этиламин, показатели значений давления в установках у последних пар практически в 2–2,5 ниже, а у последней рабочей пары приближается к атмосферному.

Вышеприведенные рассуждения позволяют рекомендовать новые рабочие пары для работы в гелиоэнергетических термотрансформаторах циклического действия.

Список источников

1. Архаров А. М., Марфенина И. В., Микулин Е. И. Криогенные системы: в 2 т. М.: Машиностроение, 1996. Т. 1. Основы теории и расчета. 576 с.
2. Abdel Aziz A. A., Hatab S. I., Moawad M., Zohir A. E., Berbish N. M. Experimental study on the Effect of adsorber with three shapes of conductive material on Performance of Adsorption Refrigeration Tube using Activated Carbon/ethanol pair // *Appl. Therm. Eng.* 2017. V. 19. P. 1246–1254.
3. Dupont M., Guillemintot J. J., Meunier F. Etude de glaciers solaires utilisant le cycle intermittent jour-nuit zeolithe 13x-eau en climat tempere et en climat tropical // *Proceedings IIR*. Jerusalem, 1982. N. 58. P. 193–200.
4. Wang L. W., Xu Z. Y., Pan Q. W., Du S., Xia Solar Z. Z. Solar driven air conditioning and refrigeration systems corresponding to various heating source temperatures // *Appl. Energy*. 2016. V. 169. P. 846–856.
5. Каримов М. Ш., Руденко М. Ф., Шипулина Ю. В. Повышение эффективности гелиоэнергетического адсорбционного термотрансформатора // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2016. № 3. С. 31–35.
6. Каримов М. Ш., Руденко М. Ф. Определение эффективности работы гелиоэнергетического термотрансформатора // *Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. (Астрахань, 16 сентября 2016 г.)*. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2016. С. 223–225.

7. Руденко М. Ф., Шипулина Ю. В. Моделирование термодинамического цикла работы адсорбционного гелиоэнергетического термотрансформатора // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология*. 2011. № 3. С. 136–140.
8. Vasiliev L. L., Mishkinis D. A., Antukh A. A., Vasiliev L. L. Jr. Solar/gas sorption heat pumps and refrigerators-nature friendly heat transport systems // *International Journal of Energy Research*. 2002. N. 26 (9). P. 825–835.
9. Xu S. Z., Wang L. W., Wang R. Z. Thermodynamic analysis of single-stage and multi-stage adsorption refrigeration cycles with activated carbon–ammonia working pair // *Energy Conversion and Management*. 2016. V. 117. P. 31–42.
10. Руденко М. Ф., Каримов М. Ш. Исследование рабочих пар для гелиоэнергетических термотрансформаторов адсорбционного типа // *Актуальные вопросы науки: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. (10.07.2012)*. М.: Спутник+, 2012. С. 49–56.
11. Рабинович В. А., Хавин З. Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978. 392 с.
12. Равдель А. А., Пономарева А. М. Краткий справочник физико-химических величин. Л.: Химия, 1983. 233 с.
13. *Справочник химика*. Общие сведения, строение вещества, свойства важнейших веществ, лабораторная техника / под ред. В. П. Никольского. М.-Л.: Хим. лит., 1962. Т. 1. 1072 с.

References

1. Arkharov A. M., Marfenina I. V., Mikulin E. I. *Kriogennyesistemy: v 2 t.* [Cryogenic systems: in 2 volumes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996. Vol. 1. Osnovy teorii i rascheta. 576 p.
2. Abdel Aziz A. A., Hatab S. I., Moawad M., Zohir A. E., Berbish N. M. Experimental study on the Effect of adsorber with three shapes of conductive material on Performance of Adsorption Refrigeration Tube using Activated Carbon/ethanol pair. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, vol. 19, pp. 1246-1254.
3. Dupont M., Guillemintot J. J., Meunier F. Etude de glaciers solaires utilisant le cycle intermittent jour-nuit zeo-

- lithe 13x-eau en climat tempere et en climat tropical. *Proceedings IIR*. Jerusalem, 1982. No. 58. Pp. 193-200.
4. Wang L. W., Xu Z. Y., Pan Q. W., Du S., Xia Solar Z. Z. Solar driven air conditioning and refrigeration systems corresponding to various heating source temperatures. *Appl. Energy*, 2016, vol. 169, pp. 846-856.
5. Karimov M. Sh., Rudenko M. F., Shipulina Yu. V. Povyshenie effektivnosti gelioenergeticheskogo adsorbtsionnogo termotransformatora [Increasing efficiency of solar energy adsorption thermotransformer]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2016, no. 3, pp. 31-35.

6. Karimov M. Sh., Rudenko M. F. Opredelenie effektivnosti raboty gelienergeticheskogo termotransformatora [Determining efficiency of solar thermal transformer]. *Noveishie tekhnologii osvoeniia mestorozhdenii uglevodородного syr'ia i obespechenie bezopasnosti ekosistem Kaspiiskogo shel'fa: materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Astrakhan', 16 sentiabria 2016 g.)*. Astrakhan', Izd-vo AGTU, 2016. Pp. 223-225.

7. Rudenko M. F., Shipulina V. Modelirovanie termodinamicheskogo tsikla raboty adsorbtsionnogo gelienergeticheskogo termotransformatora [Modeling thermodynamic cycle of adsorption solar thermal transformer]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiatehnika i tekhnologiya*, 2011, no. 3, pp. 136-140.

8. Vasiliev L. L., Mishkinis D. A., Antukh A. A., Vasiliev L. L. Jr. Solar/gas sorption heat pumps and refrigerators-nature friendly heat transport systems. *International Journal of Energy Research*, 2002, no. 26 (9), pp. 825-835.

9. Xu S. Z., Wang L. W., Wang R. Z. Thermodynamic analysis of single-stage and multi-stage adsorption refrigeration cycles with activated carbon-ammonia working pair.

Energy Conversion and Management, 2016, vol. 117, pp. 31-42.

10. Rudenko M. F., Karimov M. Sh. Issledovanie rabochikh par dliagelienergeticheskikh termotransformatorov adsorbtsionnogo tipa [Investigation of working pairs for solar thermal transformers of adsorption type]. *Aktual'nyevoprosny nauki: materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (10.07.2012)*. Moscow, Sputnik +, 2012. Pp. 49-56.

11. Rabinovich V. A., Khavin Z. Ia. *Kratkii khimicheskii spravochnik* [Short chemical reference book]. Leningrad, Khimiia Publ., 1978. 392 p.

12. Ravdel' A. A., Ponomareva A. M. *Kratkii spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Short reference book of physical and chemical quantities]. Leningrad, Khimiia Publ., 1983. 233 p.

13. *Spravochnik khimika. Obshchie svedeniia, stroenie veshchestva, svoystva vazhneishikh veshchestv, laboratornaia tekhnika* [Chemist's Handbook. General information, structure of matter, properties of essential substances, laboratory technology]. Pod redaktsiei V. P. Nikol'skogo. Moscow, Leningrad, Khimicheskaiia literatura Publ., 1962. Vol. 1. 1072 p.

Статья поступила в редакцию 22.11.2021; одобрена после рецензирования 16.12.2021; принята к публикации 17.01.2022
The article is submitted 22.11.2021; approved after reviewing 16.12.2021; accepted for publication 17.01.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Федорович Руденко – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии; Астраханский государственный технический университет; Астрахань, ул. Татищева, 16; mf.rudenko@mail.ru

Юлия Викторовна Шипулина – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии; Астраханский государственный технический университет; Астрахань, ул. Татищева, 16; aleera@mail.ru

Александра Михайловна Руденко – магистрант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, направление обучения «Информатика и вычислительная техника»; Астраханский государственный технический университет; Астрахань, ул. Татищева, 16; rudenk@astu.org

Michael F. Rudenko – Doctor of Technical Sciences; Professor; Professor of the Department of Life Safety and Environmental Engineering; Astrakhan State Technical University; Astrakhan, Tatishcheva street, 16; mf.rudenko@mail.ru

Julia V. Shipulina – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Life Safety and Environmental Engineering; Astrakhan State Technical University; Astrakhan, Tatishcheva street, 16; aleera@mail.ru

Aleksandra M. Rudenko – Master's Course Student of the Department of Automated Information Processing and Control Systems, direction Informatics and Computer Technology; Astrakhan State Technical University; Astrakhan, Tatishcheva street, 16; rudenk@astu.org

