ISNN 3030-3907

2026
MAY
ISSUE - 5
VOLUME -10

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

MAY 2026
Issue - 5, VOLUME – 10

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АДСОРБЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Курбонов Нурали Абдуллаевич
Каршинский государственный технический университет преподаватель
Джураев Шухрат Ихтиёрович
Каршинский государственный технический университет преподаватель
Курбанова Мунисахон Санджар кизи
Каршинский государственный технический университет студент
Бухоров Ҳабибулло Жаҳонгир ўғли
Каршинский государственный технический университет студент
Ештемиров Жамшидбек Олимжон ўғли
Каршинский государственный технический университет студент
Ўролов Дилшод Бахриддин ўғли
Каршинский государственный технический университет студент
Панжиев Асилбек Бекмуродович
Каршинский государственный технический университет студент

Annotatsiya. Adsorbsion issiqlik nasoslari (AIN) texnologiyasidagi yutuqlar ularning energetik samaradorligini va issiqlik tashlamalaridan foydalanishni sezilarli darajada yaxshilaydi, bu ularni barqaror sovutish uchun istiqbolli yechimga aylantiradi. Biroq, katta o‘lchamlar va rejalashtirilmagan xarajatlar kabi muammolar ularning keng ko‘lamli qo‘llanilishini cheklaydi. To‘g‘ridan-to‘g‘ri bug‘lanish/kondensatsiya va suyuq fazali sovutish agenti taqsimotiga ega ikkita adsorbsion modullarni o‘z ichiga olgan yangi uchinchi avlod adsorbsion texnologiyasi qimmat va katta vakuum klapanlariga ehtiyojni bartaraf etish va ixcham vakuum tizimlarini ishga tushirish orqali ushbu muammolarni hal qiladi, bu ularning to‘liq bozor salohiyatini ochib beradi.

Kalit so‘zlar. adsorbsion issiqlik nasoslari, samaradorlik koeffitsienti, issiqlik almashingich, o‘rta haroratli issiqlik almashingich, past haroratli issiqlik almashingich, o‘rtacha logarifmik haroratlar farqi, issiqlik tashuvchi suyuqlik.

Аннотация. Достижения в технологии адсорбционных тепловых насосов (АТН) значительно повышают их энергетическую эффективность и использование тепловых отходов, что делает их перспективным решением для устойчивого охлаждения. Однако такие проблемы, как большие габариты и непредвиденные затраты, ограничивают их широкомасштабное применение. Новая технология адсорбции третьего поколения, включающая два адсорбционных модуля с непосредственным испарением/конденсацией

ISSN 3030-3907

и распределением жидкого хладагента, решает эти проблемы за счёт устранения необходимости в дорогостоящих и крупногабаритных вакуумных клапанах и внедрения компактных вакуумных систем, что раскрывает их полный рыночный потенциал.

Ключевые слова: адсорбционные тепловые насосы, коэффициент полезного действия, теплообменник, средне температурный теплообменник, низкотемпературный теплообменник, среднелогарифмическая разность температур, теплоноситель.

Abstract. Advances in adsorption heat pump (AIN) technology have significantly improved their energy efficiency and use of heat sinks, making them a promising solution for sustainable cooling. However, issues such as large size and unplanned costs limit their widespread use. The new third generation adsorption technology, which includes two adsorption modules with direct evaporation/condensation and liquid phase cooling agent distribution, solves these problems by eliminating the need for expensive and large vacuum valves and launching compact vacuum systems, which reveals their full market potential.

Keywords. adsorption heat pumps, efficiency coefficient, heat exchanger, medium-temperature heat exchanger, low-temperature heat exchanger, mean logarithmic temperature difference, heat transfer fluid.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Адсорбционные холодильные установки представляют собой термодинамически управляемую альтернативу следующего поколения парокомпрессионным холодильным системам, что вносит значительный вклад в декарбонизацию и смягчение последствий глобального потепления [1]. Адсорбционные холодильные устройства обладают такими специфическими преимуществами, как лёгкость регенерации, минимальная коррозия, гибкость эксплуатации и экологически чистые рабочие тела [2]. Они могут обеспечивать охлаждение за счёт использования низкотемпературных тепловых ресурсов с температурой 50–90 °C и выше, аккумулируя солнечную энергию или теплоту отходящих газов. Кроме того, в них используется вода в качестве безопасного хладагента, что также снижает проблемы, связанные с коррозией. В отличие от абсорбционных холодильников, использование адсорбционных холодильных устройств исключает проблемы кристаллизации. Тем не менее, их более широкому применению препятствует более низкая эффективность (коэффициент эффективности < 0,6) по сравнению с абсорбционными холодильниками. Кроме того, стоимость и компактность адсорбционных холодильников демонстрируют их преимущество перед традиционными холодильниками [3].

ISSN 3030-3907

В последние десятилетия используются два основных поколения адсорбционных тепловых насосов (АТН). АТН первого поколения, производимые компаниями Mayekawa (Япония), Pahwa (Индия), Sortech и Viessmann (Германия), а также имеющие широкомасштабные лабораторные установки, были extensively изучены численно и экспериментально. Данные системы были детально исследованы, включая двух- и многослойные устройства, одно- и многоступенчатые схемы, а также схемы с рекуперацией тепла или массы [4].

В последние годы исследователи активизируют усилия по разработке инновационных адсорбционных тепловых насосов, уделяя внимание усовершенствованным конструкциям реакторов/теплообменников, оптимизированным термодинамическим циклам и адсорбционным материалам следующего поколения. Новизна данного исследования заключается в разработке адсорбционной системы трансформации тепла третьего поколения, состоящей из двух адсорбционных модулей с непосредственным испарением/конденсацией, распределением жидкого хладагента и минимальной тепловой массой для испарения/конденсации. В данной конфигурации не используются большие и дорогостоящие вакуумные клапаны, что позволяет создать высокоэффективную компактную и энергоэффективную вакуумную систему. Кроме того, в каждом адсорбере используется 37,5 кг композитного адсорбента (мезопористый силикагель, пропитанный хлоридом кальция), и сформированы его адсорбционные изотермы/кинетика. Продемонстрированы производительность разработанного АТН, масштабируемость системы и снижение затрат, а также проведено сравнение с традиционными АТН.

2. МЕТОДЫ.

Математическая модель адсорбционного теплового насоса, применённого в данном исследовании, разработана при строгом соблюдении законов сохранения массы и энергии. Процесс состоит из цикла переключения (switching) продолжительностью 20 с и циклов адсорбции/десорбции продолжительностью 800 с.

Динамический анализ данной модели осуществлялся путём моделирования с шагом по времени 1 с. При этом использовался решатель ODE15s, который эффективен при решении жёстких (stiff) систем дифференциальных уравнений. В текущей численной модели относительная погрешность принята равной:

$$| s_{n+1} - s_n | = 10^{-6}$$

ISSN 3030-3907

С учётом конструктивных особенностей и граничных условий существующего адсорбционного теплового насоса (например, продолжительность цикла, температуры горячей воды, охлаждающей воды и охлаждённой воды на входе) были исследованы динамические характеристики температуры компонентов системы, степени сорбции, холодопроизводительности, теплопроизводительности и коэффициента эффективности (СК) и проведено их сравнение с экспериментальными результатами. Структура и конструкция существующего адсорбционного теплового насоса показаны на рисунке 1.

Данная динамическая модель построена на основе балансов массы и энергии, а также сорбционных изотерм и кинетики. Модули адсорбера включают:

- сорбционное равновесие (изотермы) для оценки поглощения хладагента в зависимости от температуры и давления;
- кинетическую модель для оценки движения пара от испарителя/конденсатора к адсорберу и обратно;
- балансы тепла и массы для модуля адсорбера. Основной и вспомогательный теплообменники конденсатора/испарителя также были смоделированы на основе уравнений теплового и массового баланса.

3. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ АДСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

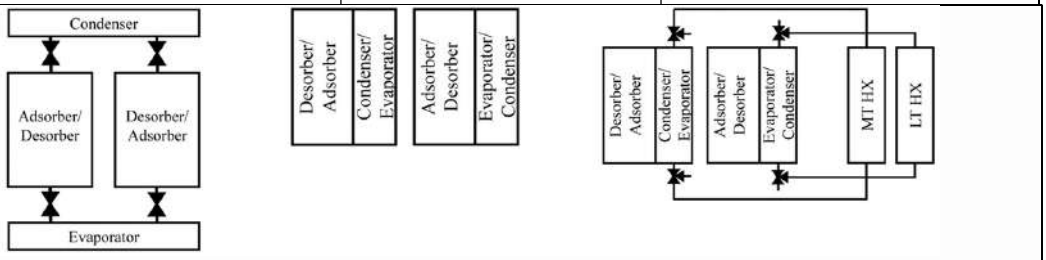
Эволюция адсорбционных холодильных установок развивается на протяжении трёх поколений (таблица 1). Первое поколение включает четыре отдельные камеры (т.е. адсорбер/десорбер, десорбер/адсорбер, испаритель и конденсатор), что гарантирует гибкость их работы благодаря разделённым теплообменникам конденсатора/испарителя с вакуумными клапанами. Тем не менее, оно полагается на крупногабаритные, дорогостоящие вакуумные клапаны и схемы для потока хладагента в паровой фазе [6]. Конструкции второго поколения были упрощены до двух комбинированных камер (адсорбер/десорбер и испаритель/конденсатор), крупногабаритные вакуумные клапаны были удалены, но при этом наблюдаются тепловые потери и низкая производительность [5]. Устройства третьего поколения, разработанные компанией Sorption Technologies GmbH [7], внедрили распределение жидкого хладагента, что обеспечивает непосредственное испарение/конденсацию внутри адсорбционного модуля и устраняет необходимость в сложных вакуумных системах [8].

ISSN 3030-3907

Описание адсорбционной холодильной установки третьего поколения показано на рисунке 1. В режиме десорбции/конденсации жидкий хладагент (вода) проходит через смесительный конденсатор внутри десорберного модуля. Смесительный конденсатор расположен в модуле концентрически, где жидкий хладагент собирается в виде смачивающей плёнки на контурах, увеличивающих пористую структуру/площадь поверхности, что позволяет десорбированному хладагенту непосредственно конденсироваться и, как следствие, нагревать хладагент. Затем жидкий хладагент подаётся в качестве теплоносителя во внешний теплообменник среднего температурного уровня, откуда с помощью насоса перекачивается в конденсаторный бак.

1-таблица

Этапы развития адсорбционных холодильных установок.

Параметры	1-е поколение (с 1990-х по настоящее время)	2-е поколение (с 2005 г. по настоящее время)	3-е поколение (с 2020 г. по настоящее время)
Конфигурация			
Преимущества	• Гибкость работы (благодаря разделённым конденсатору/испарителю)	• Компактная конструкция с одним конденсатором/испарителем • Прямой перенос пара без клапанов • Улучшенная адсорбция с покрытием теплообменников (ТА) • Упрощённая вакуумная система	• Распределение хладагента в жидкой фазе • Непосредственный фазовый переход жидкого хладагента внутри сорбционных реакторов (т.е. испарение/конденсация) • Ограниченные тепловые потери благодаря минимальной тепловой массе конденсатора/испари

ISSN 3030-3907

			теля (изготовлены из пластика) • Управление перекачкой жидкого хладагента при низких давлениях
Недостатки	• Распределение хладагента в паровой фазе • Крупногабаритные вакуумные клапаны • Сложная/дорогостоящая вакуумная система	• Тепловые потери и пульсации в теплообменниках конденсатора/испарителя • Смешение циклов и разделение системы • Требования к внешним теплообменникам	
Производитель	Mayekawa (Япония), Pahwa (Индия), Sortech (Германия)	Sortech/Fahrenheit (Германия)	Sorption Technologies GmbH (Германия)

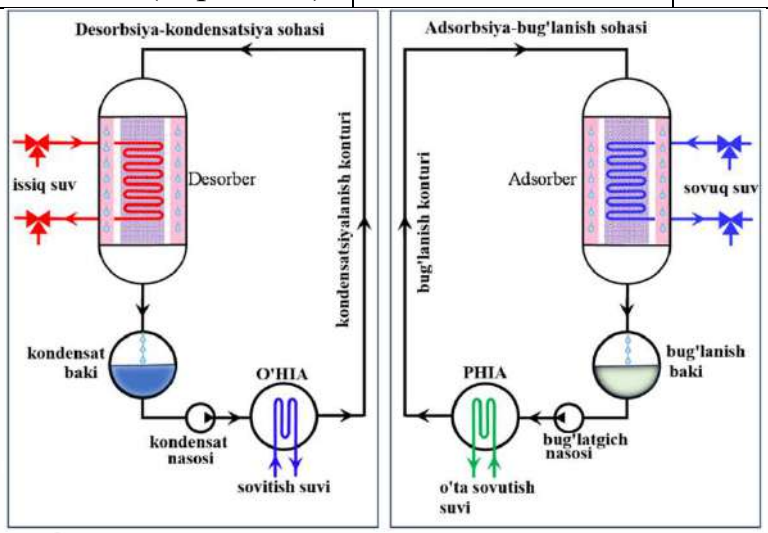


Рисунок 1. Схема адсорбционного теплового насоса (АТН) третьего поколения

4. ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЁТНОЙ СХЕМЫ.

И наоборот, в режиме адсорбции/испарения жидкий хладагент проходит через смесительный испаритель внутри модуля адсорбера. Аналогичным образом происходит непосредственное испарение

ISSN 3030-3907

адсорбированного хладагента, что приводит к охлаждению хладагента. При этом жидкий хладагент перекачивается в резервуар испарителя.

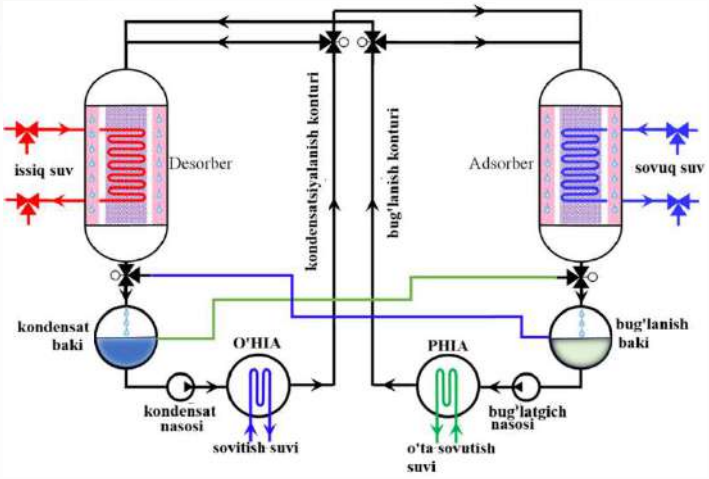


Рисунок 2. Объединённая схема адсорбционного теплового насоса (ТН)

Для непрерывной или полунепрерывной работы используются два сорбционных модуля, включающих теплообменник среднего температурного уровня со смесительным испарителем/конденсатором (СрТТ), низкотемпературный теплообменник (НТТ), два гидравлических насоса и четырёхходовые (или трёхходовые) клапаны, как показано на рисунке 2. Режимы десорбции/конденсации и адсорбции/испарения поочерёдно реализуются внутри сорбционных модулей, при этом внешние СрТТ и НТТ сохраняют свои функции.

5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Представляемая математическая модель включает управляющие уравнения для изотерм/кинетики адсорбции $CaCl_2$@SG_25, энергетические и массовые балансы основных компонентов системы, а также показатели эффективности адсорбционного теплового насоса (АТН).

5.1. Равновесие и кинетика адсорбции

С использованием уравнения Дубинина-Астахова (Д-А) равновесие адсорбции водяного пара в композите $CaCl_2$@SG_25 описывается следующим образом [9]:

$$W = W_0 \exp\left[-\left(\frac{RT_s}{E}\ln\left(\frac{P}{P_{sat}}\right)\right)^n\right] \quad (1)$$

где: $W0$— максимальная равновесная величина адсорбции; nn— константа неоднородности; Ts— температура сорбента; E — характеристическая энергия адсорбции. Кроме того: Psat— давление насыщения при соответствующей температуре; P — давление пара.

$$RT_s \ln\left(\frac{P}{P_{sat}}\right)$$

ISSN 3030-3907

Выражение обозначает адсорбционный потенциал и обозначается через.

Кинетика сорбции для пары $CaCl_2$@SG_25/водяной пар (w) определяется с использованием метода линейной движущей силы (ЛДС) следующим образом: [10]:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = k(W - w), \quad (2)$$

где кинетический коэффициент (k) записывается следующим образом [11]:

$$K = M\exp\left(-\frac{N}{RT_s}\right). \quad (3)$$

Где M и N— корректировочные параметры, которые приведены в таблице 2.

2-таблица

Параметры, необходимые для изотерм и кинетики адсорбции $CaCl_2$@SG_25

Параметр	Описание	Единица измерения
W_0	максимальная равновесная адсорбция	0.8 (kg/kg)
E	характеристическая энергия	174.4 (kJ/kg)
n	константа неоднородности	1.08 (-)
M	параметр настраиваемости (кинетический)	2.73E–03 (m^2/s)
N	параметр настраиваемости (температурный)	15.993558 (kJ/kg*K)
H_{st}	изостерическая теплота адсорбции	155.1 ln(W)+2381.5 (kJ/kg)

5.2. Энергетический баланс

Энергетический баланс адсорбера-реактора моделируется следующим образом [12]:

$$\left(Mc_p\right)_{ad}\frac{dT_{ads}}{dt} = M_s H_{st}\frac{dw_{ads}}{dt} + \dot{m}_{cw}c_{p,cw}(MT_{in} - MT_{out}). \quad (4)$$

Энергетический баланс десорбера-реактора моделируется следующим образом:

$$\left(Mc_p\right)_{des}\frac{dT_{des}}{dt} = M_s H_{st}\frac{dw_{des}}{dt} + \dot{m}_{hw}c_{p,hw}(HT_{in} - HT_{out}). \quad (5)$$

ISSN 3030-3907

Энергетический баланс для процесса непосредственной конденсации задаётся следующим образом:

$$(Mc_p)_{cond}\frac{dT_{cond}}{dt} = -[M_s h_{fg}]\frac{dw_{des}}{dt} + \dot{m}_{cond}c_{p,w}(T_{cond,in} - T_{con\ ,out}). \quad (6)$$

Энергетический баланс для процесса непосредственного испарения задаётся следующим образом:

$$(Mc_p)_{cond}\frac{dT_{evap}}{dt} = -[M_s h_{fg}]\frac{dw_{ads}}{dt} + \dot{m}_{evap}c_{p,w}(T_{evap,in} - T_{evap,ou}). \quad (7)$$

Энергетический баланс пластинчатого теплообменника (конденсатора) для отвода внешнего тепла задаётся следующим образом:

$$(Mc_p)_{cond}\frac{dT_{p-cond}}{dt} = -\phi[M_s h_{fg}]\frac{dw_{des}}{dt} + \dot{m}_{cw}c_{p,cw}(MT_{in} - MT_{out}). \quad (8)$$

Энергетический баланс пластинчатого теплообменника (испарителя) для подачи внешней охлаждённой воды задаётся следующим образом:

$$(Mc_p)_{cond}\frac{dT_{p-evap}}{dt} = -\phi[M_s h_{fg}]\frac{dw_{des}}{dt} + \dot{m}_{chw}c_{p,chw}(LT_{in} - LT_{out}). \quad (9)$$

где символ ϕ принимается равным нулю в периоды переключения предварительного нагрева/охлаждения, когда гидравлический насос хладагента выключен.

Выходные температуры компонентов системы оцениваются с использованием метода среднелогарифмической разности температур (СЛРТ — LMTD) следующим образом [13]:

$$T_{HX,out} = T_{HX} + (T_{HX,in} - T_{HX})\exp(-NTU). \quad (10)$$

Число единиц переноса (ЧЕП) определяется как отношение общего коэффициента теплопередачи ($U\,A_{\text{ТО}}$) к расходу теплоносителя ($m^{\cdot}cp$).

Следует отметить, что значения UA оцениваются с помощью данной экспериментальной работы следующим образом:

$$UA_{HX} = \frac{Q}{LMTD}, \quad (11)$$

$$LMTD = \frac{T_{HX,out} - T_{HX,in}}{\ln\left(\frac{T_{HX} - T_{HX,in}}{T_{HX} - T_{HX,out}}\right)}. \quad (12)$$

где температура теплообменника соответствует равновесной температуре адсорбера/десорбера или температуре насыщения конденсатора/испарителя.

Число единиц теплопереноса (NTU) равно отношению общего коэффициента теплопередачи (UAНХ) к потоковой теплоёмкости теплоносителя ($m^{\cdot}cp$).

5.3. Баланс массы

Массовый расход адсорбированного или десорбированного вещества определяется следующим образом:

$$\dot{m}_{ads/des} = M_s\frac{dw_{ads/des}}{dt}. \quad (13)$$

ISSN 3030-3907

Значения массового потока адсорбции/десорбции, общего коэффициента теплопередачи и теплоёмкости основных компонентов приведены в таблице 3.

Удельная холодопроизводительность (УХП) и удельная теплопроизводительность (УТП) оцениваются следующим образом:

$$SCU = \frac{Q_{PH}}{M_s}, \quad (14)$$

$$SIU = \frac{Q_{OTH}}{M_s}. \quad (15)$$

3-таблица

Константы и параметры нового адсорбционного теплового насоса (АТН).

Параметр	Значение	Единица
Ms	37.5	kg
$(Mcp)_{ads/des}$	120	kJ/kg
$(M\ cp)_{cond}$	3.0	kJ/kg
$(M\ cp)_{evap}$	3.0	kJ/kg
$UA_{ads/des}$	2.0	kW/K
UA_{cond}	3.0	kW/K
UA_{evap}	3.0	kW/K
UA_{p-cond}	3.5	kW/K
UA_{p-evap}	3.5	kW/K
$\dot{m}_{ads/des}$	0.63/0.95	kg/s
$\dot{m}_{cond}$	0.29	kg/s
$\dot{m}_{evap}$	0.28	kg/s
$\dot{m}_{MT}$	0.63	kg/s
$\dot{m}_{LT}$	0.34	kg/s

Коэффициент эффективности (СК) для охлаждения и нагрева оценивается следующим образом:

$$COP_c = \frac{Q_{LT}}{Q_{HT}} \quad (16)$$

$$COP_h = \frac{Q_{MT}}{Q_{HT}}. \quad (17)$$

6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе освещены концепция работы и динамическая эффективность адсорбционного теплового насоса.

6.1. Подтверждение концепции (Proof-of-Concept)

Размеры системы:

$$2{,}1 \times 0{,}99 \times 2{,}46\ м^3$$

ISSN 3030-3907

Объём модуля адсорбера и баков конденсатора/испарителя составляют соответственно 0,23 и 0,025 м³.

Модуль адсорбера состоит из двух частей:

1. непосредственное испарение;
2. непосредственная конденсация.

Капли воды стекают по пористым структурам в баки хладагента. Трёхходовые и двухходовые клапаны обеспечивают координацию циклов адсорбции и десорбции. Датчики температуры, давления и расхода контролируют работу системы.

С целью повышения эффективности конденсации и испарения модули адсорбера установлены наклонно и изолированы полиуретаном толщиной 10 мм. Это обеспечивает хорошее стекание капель воды в баки.

Расход хладагента и теплоносителя (HTF) регулируется с помощью трёхфазных гидравлических насосов. Подача HTF осуществляется из трёх накопительных резервуаров, обеспечивающих высокий (ВУ), средний (СУ) и низкий (НУ) температурные уровни для системы.

Следует отметить, что общий коэффициент теплопередачи (UA) для пленочного конденсатора и испарителя составляет приблизительно 3 кВт/К.

$$UA \approx 3 \text{ kW/K}$$

Данный показатель значительно превышает значения, приведённые в других исследованиях. Столь высокие значения UAUA объясняются главным образом процессом непосредственного испарения-конденсации и непрерывным движением капель жидкости по пористой структуре.

Температурный перепад (temperature lift) — термическая разница между источником тепла и охлаждающей средой — является важным показателем эффективности адсорбционного теплового насоса. Экспериментальные результаты (рисунок 8) показали наличие сильной обратной зависимости между холодопроизводительностью и температурным перепадом. При увеличении температурного перепада с 27 К до 32 К холодопроизводительность снизилась примерно с 8 кВт до 2 кВт.

Кроме того, коэффициент эффективности (СК) снизился с приблизительно 0,5 при 25–26 К до 0,35 при около 30 К. Это свидетельствует о том, что более высокий температурный перепад требует больших тепловых затрат, что, в свою очередь, приводит к снижению эффективности системы.

В целом, проведённый анализ подтверждает, что адсорбционный тепловой насос обладает наибольшей эффективностью при низких температурных перепадах.

ISSN 3030-3907

Можно сделать вывод, что путём простого изменения архитектуры технологии и устранения необходимости в крупногабаритных вакуумных клапанах капитальные затраты на одну машину могут быть снижены более чем на 10 000 евро. Фактическая разница в стоимости также зависит от масштаба производства, поставщика компонентов и других факторов. Тем не менее, данный анализ создаёт прочную основу для инвестирования в дальнейшую разработку и оптимизацию этой новой технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В данном исследовании была разработана и испытана с помощью экспериментальной установки и численного моделирования новая адсорбционная технология, названная «адсорбционной технологией третьего поколения». Условия работы были систематически изучены, и проведён сравнительный анализ для оценки практичности данной передовой технологии. Новый адсорбционный тепловой насос продемонстрировал стабильные тепловые характеристики, аналогичные традиционным системам, благодаря способности обеспечивать высокую тепловую мощность, эффективно управлять фазовым переходом и улучшать внутренний теплообмен.

Результаты динамического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, причём отклонение по всем основным показателям составляет менее 10%, что подтверждает надёжность модели. Данная система способна обеспечить холодопроизводительность 3,84 кВт и теплопроизводительность 11,07 кВт при коэффициентах эффективности (СК) 0,43 и 1,16 соответственно в условиях 90/20/20 °C. С повышением температуры горячей воды на входе и температуры охлаждающей воды на входе эффективность системы значительно улучшается, тогда как высокая температура охлаждающей воды оказывает негативное влияние на эффективность. Длительные полуциклы обеспечивают полное протекание процессов адсорбции/десорбции, повышая тепловую эффективность и стабильность работы.

По сравнению с традиционными системами адсорбционной трансформации, конструкция третьего поколения значительно снижает капитальные затраты за счёт замены крупногабаритных вакуумных клапанов компактными насосами и клапанами малого размера. В целом, инновационная архитектура системы демонстрирует высокую термодинамическую эффективность и экономическую целесообразность, что делает её перспективным решением для использования низкопотенциальных тепловых источников.

ISSN 3030-3907

Будущие исследования могут быть направлены на оценку долгосрочной энергетической эффективности, а также на изучение возможностей интеграции с гибридными энергетическими системами, включая солнечные тепловые технологии, сети централизованного теплоснабжения и охлаждения, а также системы утилизации тепловых отходов. Особое значение имеют системы, адаптированные к прерывистым или переменным источникам тепловой энергии. Такие усовершенствования будут способствовать более эффективному использованию энергии и расширят возможности декарбонизации в промышленной и городской инфраструктуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Shabir, M. Sultan, T. Miyazaki, B.B. Saha, A. Askalany, I. Ali, Y. Zhou, R. Ahmad, R.R. Shamshiri, Recent updates on the adsorption capacities of adsorbent- adsorbate pairs for heat transformation applications, Renew. Sustain. Energy Rev. 119 (2020) 109630, https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109630.
2. M.G. Gado, S. Ookawara, S. Nada, I.I. El-Sharkawy, Hybrid sorption-vapor compression cooling systems : a comprehensive overview, Renew. Sustain. Energy Rev. 143 (2021) 110912, https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110912.
3. F. He, K. Nagano, J. Togawa, Experimental study and development of a low-cost 1 kW adsorption chiller using composite adsorbent based on natural mesoporous material, Energy 209 (2020) 118365, https://doi.org/10.1016/j. energy.2020.118365.
4. P.R. Chauhan, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, Current status and technological advancements in adsorption refrigeration systems: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 154 (2022) 111808, https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111808.
5. T. Nú˜ nez, W. Mittelbach, H.-M. Henning, Development of an adsorption chiller and heat pump for domestic heating and air-conditioning applications, Appl. Therm. Eng. 27 (2007) 2205–2212, https://doi.org/10.1016/j. applthermaleng.2005.07.024.
6. S. Vasta, A. Freni, A. Sapienza, F. Costa, G. Restuccia, Development and lab-test of a mobile adsorption air-conditioner, Int. J. Refrig. 35 (2012) 701–708, https://doi. org/10.1016/j.ijrefrig.2011.03.013.
7. W. Mittelbach, Adsorption Refrigeration Machine or Heat Pump with a Liquid-phase Refrigerant Distribution Function, and Method for Operating the Adsorption Refrigeration Machine, 2022 20220390154.
8. M.G. Gado, V. Palomba, V. Brancato, A. Frazzica, An innovative intermediate-based sorption thermal energy storage (STES) concept for power-to-heating/ cooling purposes in buildings: from experimental dynamics to operational

ISSN 3030-3907

examination, Energy Convers. Manag. 327 (2025) 119584, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119584.
9. C. Wang, H. Yang, B. Nie, B. Zou, Z. Li, J. Han, L. Tong, L. Wang, Y. Ding, Discharging behavior of a shell-and-tube based thermochemical reactor for thermal energy storage: modeling and experimental validation, Int. J. Heat Mass Transf. 183 (2022) 122160, https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122160.
10. M. Gado, E. Elgendy, K. Elsayed, M. Fatouh, Performance enhancement of an adsorption chiller by optimum cycle time allocation at different operating conditions, Adv. Mech. Eng. 11 (2019) 1–12, https://doi.org/10.1177/1687814019884780.
11. M. Li, Y. Zhao, R. Long, Z. Liu, W. Liu, Gradient porosity distribution of adsorbent bed for efficient adsorption cooling, Int. J. Refrig. 128 (2021) 153–162, https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.03.013.
12. X. Hou, R. Sun, J. Huang, W. Geng, X. Li, X. Zhang, 4E evaluation and optimization of a hybrid CCHP system integrated PEM fuel cell and adsorption chiller, Renew. Energy 231 (2024) 120981, https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120981.
13. M.G. Gado, E. Elgendy, K. Elsayed, M. Fatouh, Parametric study of an adsorption refrigeration system using different working pairs, Int. Conf. Aerosp. Sci. Aviat. Technol. 17 (2017) 1–15, https://doi.org/10.21608/asat.2017.22455.

ISSN 3030-3907