

УДК 621.57

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ
ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ПОВЫШАЮЩЕГО ТИПА
ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ СРЕДНЕТЕМПЕРАТУРНЫХ
ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

**С.В. Алексеенко², Д.Г. Мухин^{1,2}, К.И. Степанов², С.Л. Елистратов^{1,2},
Н.В. Миронова¹**

¹Новосибирский государственный технический университет

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

На территории Российской Федерации имеется большое количество геотермальных источников тепла с низким температурным потенциалом – не более 50 °С, на базе которых возможно создание экологически чистых систем теплоснабжения с использованием тепловых насосов. Выполнены оценки эффективности использования для этих целей абсорбционных тепловых насосов повышающего типа, в которых геотермальный или техногенный теплоисточник с температурой 40...45 °С теоретически способен обеспечить в зимний период нагрев теплоносителя системы теплоснабжения до 55...63 °С при удельных затратах электрической энергии на работу растворных, циркуляционных насосов, систем автоматизации и управления не более 1,0 % от их полезной теплопроизводительности. В качестве охлаждающей среды рассматривался окружающий воздух с отрицательными температурами, достаточными для понижения температуры охлаждающей жидкости до минус 4 °С. Диапазон полученных расчетных значений коэффициентов трансформации теплоты для рассмотренных условий составил $\alpha = 0,46...0,47$. Проведен анализ сравнительных преимуществ и недостатков использования в качестве рабочих тел водных растворов солей LiBr и LiCl, на основании которого показана перспективность применения в абсорбционных тепловых насосах повышающего типа водных растворов соли LiCl.

Ключевые слова: геотермальный теплоисточник, отопление и горячее водоснабжение, абсорбционный тепловой насос повышающего типа, водные растворы бромидов и хлоридов лития.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-3-46-58

Введение

Для объектов промышленного и гражданского назначения в труднодоступных районах России с холодным климатом, прежде всего на территории Севера и Дальнего Востока, актуальной является задача организации надежного отопления и горячего водоснабжения (ГВС), в том числе с использованием местных возобновляемых энергоресурсов. При наличии высокотемпературных (более 90 °С) геотермальных источников тепла эту задачу можно решить путем создания систем прямого отопления. Однако большая часть используемых и разведанных геотермальных источников России [1, 2] имеет температуру воды на устье скважин не более 50 °С, что не позволяет обеспечить отопление и ГВС. Так, например, известные геотермальные источники в пос. Белый Яр Томской области [3] и в Тункинской долине Республики Бурятия [4] используются только для бальнеологии. Следует также отметить, что такой среднетемпературный уровень имеют

Расчеты цикла повышающего АБТН выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН АААА-А17-121031800229-1.

пластовые воды нефтедобывающих скважин. Необходимо иметь в виду, что температура горячей воды для ее полного обеззараживания в системах ГВС закрытого типа [5] должна быть более 50 °С.

Для преобразования теплоты низкого (до 40 °С) в высокотемпературное тепло (свыше 50 °С) для нужд отопления и ГВС в мире широко применяют тепловые насосы парокомпрессионного типа (ПКТН), использующие для своей работы электроэнергию, что не всегда является технически возможным и экономически выгодным. Так, например, при утилизации теплоты артезианской воды с температурой 7...10 °С для выработки 1,0 МВт тепла с температурой 60 °С потребуется затратить около 0,3 МВт электроэнергии. При наличии источников тепла с температурой свыше 20 °С технически возможно использование абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов (АБТН), для реализации рабочих циклов которых используют не электрическую, а тепловую энергию высокого температурного потенциала (продукты сжигания природного газа, водяной пар с давлением более 4 атм. и т. п.) и незначительное количество электроэнергии для работы растворных насосов и приборов автоматики. Согласно многочисленным данным зарубежных и российских производителей эти затраты не превышает 3...4 кВт электроэнергии на каждые 1000 кВт выработанной тепловой энергии.

По температурному потенциалу теплоты, используемой для реализации рабочих циклов, АБТН подразделяются на повышающий и понижающий типы (далее «повышающий АБТН» и «понижающий АБТН»). В понижающем АБТН используется внешний источник энергии высокого температурного потенциала, а полезным продуктом является тепло более низкого температурного потенциала. Согласно принятой классификации [6] повышающие АБТН относятся к теплотехническим устройствам расщепляющего типа, в которых производится трансформация входящего в них потока тепловой энергии среднего температурного уровня (~40...50 °С) соответственно на более высокий и более низкий температурные уровни. Таким образом, в повышающем АБТН большее количество среднетемпературной теплоты греющего геотермального источника можно преобразовать в меньшее количество высокопотенциальной теплоты для нужд отопления и ГВС.

Принципиальным преимуществом повышающих АБТН в системах геотермального теплоснабжения является то, что они не используют для своей работы традиционные высокопотенциальные источники тепловой энергии (водяной пар, природный газ, высокотемпературные отходящие дымовые газы и т. п.). Достаточным является наличие только источника теплоты среднего температурного уровня (термальная, пластовая вода и т. п.) и низкопотенциального источника охлаждающей среды. В качестве последнего может рассматриваться окружающий воздух отрицательных температур.

Таким образом, эффективность практического применения повышающих АБТН в системах отопления и ГВС определяется возможностью прямой утилизации с их помощью теплоты наиболее распространенных в России геотермальных источников среднего температурного потенциала, а также сравнительной простотой конструкции и эксплуатационной надежностью.

1. Схема и принцип работы повышающего АБТН с одноступенчатыми абсорбцией и десорбцией

Принцип работы повышающего АБТН с одноступенчатыми процессами абсорбции и десорбции (рис. 1) основан на способности водного раствора соли LiBr (абсорбента) поглощать (абсорбировать) пар хладагента (воды), имеющего в равновесном состоянии более низкую температуру, чем сам раствор [6]. Это позволяет

производить передачу определенной части тепла от источника теплоты среднего температурного потенциала на более высокий температурный уровень для обеспечения работы систем отопления и ГВС в отопительном периоде, а также в некоторых предельных случаях для нагрева жидкостей до 120 °С и генерации пара низкого давления в промышленности [7].

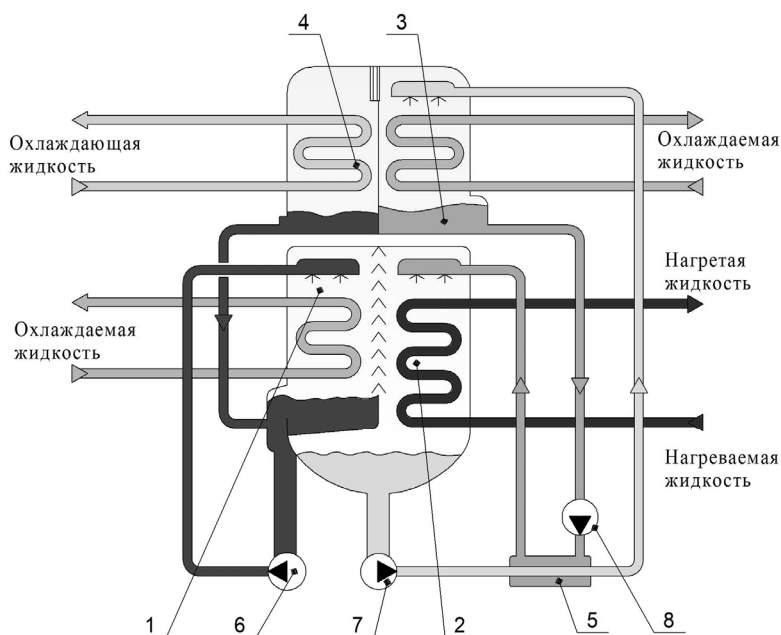


Рис. 1 – Принципиальная схема повышающего АБТН с одноступенчатой абсорбцией и десорбцией:

1 – испаритель; 2 – абсорбер; 3 – генератор (десорбер); 4 – конденсатор; 5 – растворный теплообменник; 6 – циркуляционный насос хладагента (воды); 7 – насос слабого раствора; 8 – насос крепкого раствора

Fig. 1 – A principal scheme of a boost LBAHP with single-stage absorption and desorption:

1 – is an evaporator; 2 – is an absorber; 3 – is a generator (desorber); 4 – is a condenser; 5 – is a solution heat exchanger; 6 – is a circulation pump of a refrigerant (water); 7 – is a weak solution pump; 8 – is a strong solution pump

Утилизация теплоты среднего температурного потенциала производится в испарителе 1 и генераторе 3. Полезным выходным продуктом в повышающем АБТН является теплоноситель, нагретый в абсорбере 2. Для работы генератора 3 необходим подвод охлаждающей жидкости в конденсатор 4, где происходит конденсация паров хладагента. Для повышения энергетической эффективности используется рекуперативный растворный теплообменник 5, предназначенный для одновременного охлаждения слабого раствора перед его подачей в генератор 3 и нагрева крепкого раствора перед его подачей в абсорбер 2. Для осуществления непрерывной циркуляции раствора и хладагента используются герметичные насосы хладагента и раствора 6–8.

В межтрубном пространстве АБТН поддерживается разрежение (вакуум), что исключает попадание хладагента и абсорбента в охлаждаемую и нагреваемую жидкости. Для поддержки необходимого уровня разрежения в АБТН используется специальная система газоотделения (на рис. 1 не показана). В повышающем

АБТН в отличие от стандартного понижающего АБТН рекуперативный растворный теплообменник работает по обратной схеме: крепкий раствор после генератора нагревается, а слабый раствор после абсорбера охлаждается.

2. Исходные данные и методика расчета цикла повышающего АБТН

Исходные данные для расчета параметров цикла повышающего АБТН при использовании теплоты геотермального источника приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Исходные данные для расчета цикла повышающего АБТН
Initial data for calculating the cycle of boost LBANP

Параметр	Значение
Температура геотермальной воды на входе в испаритель и генератор $t_{s1}, t_{h1}, ^\circ\text{C}$	40...45
Температура геотермальной воды на выходе из испарителя и генератора $t_{s2}, t_{h2}, ^\circ\text{C}$	35...40
Температура конденсации хладагента в конденсаторе $t_k, ^\circ\text{C}$	4
Недорекуперация теплоты хладагента на холодном конце испарителя (разница температур между геотермальной водой на выходе из испарителя t_{s2} и испаряемым хладагентом t_0), $^\circ\text{C}$	3
Недорекуперация теплоты крепкого раствора на горячем конце генератора (разница температур между геотермальной водой на выходе из генератора t_{h2} и крепким раствором на выходе из генератора t_4), $^\circ\text{C}$	3
Недорекуперация теплоты хладагента на горячем конце конденсатора (разница температур между охлаждающей жидкостью на выходе из конденсатора t_{k2} и конденсируемым хладагентом t_k), $^\circ\text{C}$	3

Для оценки энергетической эффективности рабочего цикла повышающего АБТН определяют значения коэффициента трансформации теплоты [8]:

$$\alpha = \frac{q_a}{q_0 + q_h}, \quad (1)$$

где q_a , q_0 и q_h – соответственно удельные тепловые потоки в абсорбере, испарителе и генераторе, кДж/кг.

На практике количественные значения α будут определяться совершенством теплообменного оборудования и параметрами внешних теплоносителей.

На рис. 2 приведена расчетная схема повышающего АБТН с одноступенчатой абсорбцией и десорбцией, на которой обозначены характерные точки, определяющие начало и завершение рабочих процессов.

Для рабочего цикла повышающего АБТН (см. рис. 1, 2 и 3) характерны следующие процессы:

- пленочное испарение хладагента (воды) при постоянной температуре t_0 и давлении p_0 в испарителе (процесс 1-1');
- нагрев хладагента (воды) при движении из конденсатора в межтрубное пространство испарителя (процесс 3-1);
- конденсация перегретого водяного пара, выходящего из упариваемого раствора, при постоянной температуре t_k и давлении p_k (процесс 3'-3);

- нагрев концентрированного (крепкого) раствора LiBr в рекуперативном растворном теплообменнике (процесс 4-8);
- подогрев концентрированного раствора LiBr и абсорбция водяных паров с разбавлением крепкого раствора до концентрации слабого раствора (процесс 8-2);
- охлаждение слабого раствора LiBr в рекуперативном растворном теплообменнике (процесс 2-7);
- десорбция слабого раствора LiBr в генераторе с повышением его концентрации до уровня крепкого раствора (процесс 7-4).

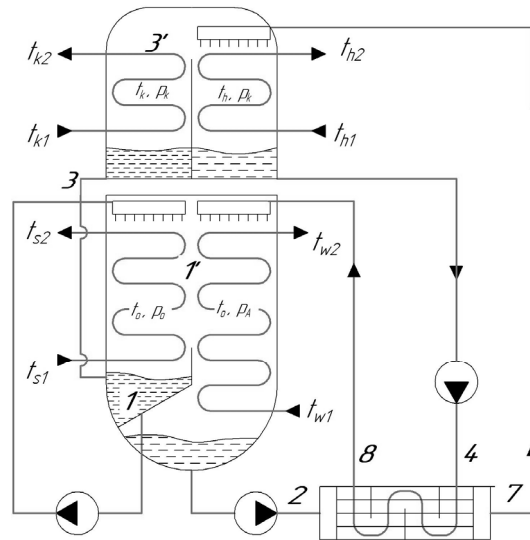


Рис. 2 – Характерные точки рабочего цикла повышающего АБТН с одноступенчатой абсорбцией и десорбцией

Fig. 2 – Characteristic points of the duty cycle of boost LBAHP with single-stage absorption and desorption

Расчет рабочего цикла был выполнен согласно приведенной в работе [6] методики с учетом опыта экспериментальных исследований [9] и эксплуатации реальных промышленных образцов АБТН.

Основные расчетные соотношения следующие:

- кратность циркуляции раствора

$$a = \frac{\xi_r}{\Delta\xi}, \quad (2)$$

где ξ_r и $\Delta\xi$ – соответственно концентрация крепкого раствора и разность концентраций крепкого и слабого растворов (зона дегазации), %;

- удельный тепловой поток в генераторе (десорбере), кДж/кг,

$$q_h = i_{3'} - i_4 + a(i_4 - i_7); \quad (3)$$

- удельный тепловой поток в испарителе, кДж/кг,

$$q_0 = i_1' - i_3; \quad (4)$$

– удельный тепловой поток в конденсаторе, кДж/кг,

$$q_k = i_{3'} - i_3; \quad (5)$$

– удельный тепловой поток в абсорбере, кДж/кг,

$$q_a = i_1' - i_8 + a(i_8 - i_2); \quad (6)$$

– удельный тепловой поток в рекуперативном теплообменнике, кДж/кг,

$$q_t = a(i_2 - i_7) = (a - 1)(i_8 - i_4), \quad (7)$$

где i_i – энтальпии хладагента и раствора в соответствующих рабочих точках цикла (см. рис. 2, 3), кДж/кг;

– уравнение теплового баланса повышающего АБТН

$$q_0 + q_n = q_a + q_k. \quad (8)$$

В процессе расчетов были определены температура и давление абсорбента и хладагента в характерных точках, оптимальная концентрация крепкого и слабого растворов, произведена оценка значений коэффициента трансформации теплоты, определены теоретические значения температур нагретой жидкости на выходе из абсорбера.

Принципиальное отличие цикла повышающего АБТН от стандартного цикла понижающего АБТН заключается в том, что крепкий раствор LiBr поступает в абсорбер недогретым относительно равновесной температуры начала абсорбции. С одной стороны, это улучшает процесс абсорбции, так как он начинается сразу после входа крепкого раствора в абсорбер. Но с другой, из-за разбавления крепкий раствор не достигает равновесной температуры начала абсорбции и попадает на трубчатку абсорбера с существенно меньшей температурой (на рис. 3 это температура в зоне правого края заштрихованной области). Данное обстоятельство важно именно для повышающего АБТН, так как от температуры крепкого раствора на входе в абсорбер зависит температура, до которой возможен нагрев теплоносителя системы теплоснабжения.

3. Результаты расчетов

На рис. 3 представлен в графическом виде один из результатов расчета на диаграмме Дюринга [10].

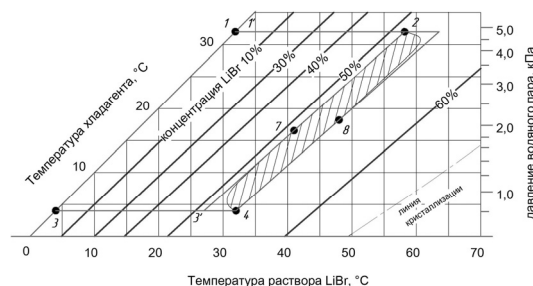


Рис. 3 – Теоретический цикл повышающего АБТН с одноступенчатой абсорбцией и десорбцией для исходной температуры геотермального источника 40 °С
Fig. 3 – A theoretical cycle of a boost absorption heat pump with single-stage absorption and desorption for the initial temperature of the geothermal source of 40 °С

На рис. 4 приведена зависимость расчетных значений коэффициента трансформации повышающего АБТН в зависимости от температуры геотермального источника и параметров цикла.

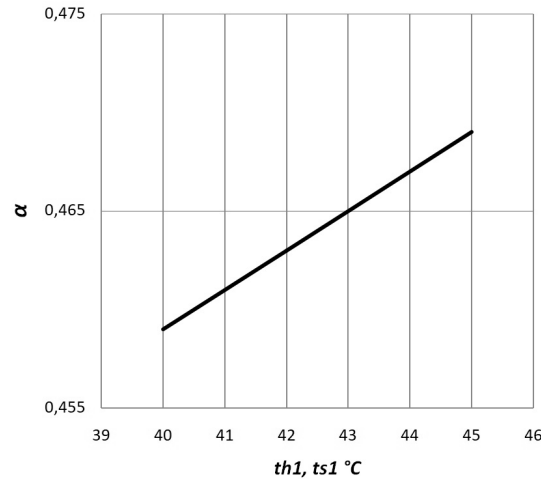


Рис. 4 – Расчетная зависимость коэффициента трансформации α повышающего АБТН от температуры воды на входе в испаритель и генератор t_{s1}, t_{h1} при температуре конденсации хладагента в конденсаторе $t_k = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$

Fig. 4 – The calculated dependence of the transformation ratio α of the boost LBAHP on the water temperature at the inlet to the evaporator and generator t_{s1}, t_{h1} at the temperature of the refrigerant condensation in the condenser $t_c = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$

В табл. 2 представлены практически важные для разработки повышающих АБТН параметры.

Таблица 2 / Table 2

Температуры внешних теплоносителей для обеспечения работы повышающего АБТН

The temperature of external heat carriers to ensure the operation of the boost LBAHP

Параметр	Температура геотермальной воды на входе в АБТН (испаритель и генератор) $t_{s1}, t_{h1}, \text{ } ^\circ\text{C}$	
	40	45
Температура геотермальной воды на выходе из испарителя и генератора, $t_{s2}, t_{h2}, \text{ } ^\circ\text{C}$	35	40
Температура охлаждающей жидкости (антифриза) на входе в конденсатор $t_{k1}, \text{ } ^\circ\text{C}$	–4	–4
Температура охлаждающей жидкости (антифриза) на выходе из конденсатора $t_{k2}, \text{ } ^\circ\text{C}$	1	1
Температура нагреваемой среды на входе в абсорбер $t_{w1}, \text{ } ^\circ\text{C}$	до 50	до 58
Температура нагретой среды на выходе из абсорбера $t_{w2}, \text{ } ^\circ\text{C}$	до 55 (уточняется экспериментально)	до 63 (уточняется экспериментально)

Необходимо отметить, что ранее в работе [8] были построены общие расчетные диаграммы эффективности повышающего АБТН в зависимости от параметров внешних теплоносителей, однако в этой работе не ставилась задача по оценке достижимой температуры нагретой жидкости и значение температуры нагрева жидкости 50 °С в работе было принято заведомо ниже необходимого для теплоснабжения и ГВС уровня.

4. Оценка возможности использования водного раствора LiCl в абсорбционном тепловом насосе повышающего типа

В качестве абсорбента в повышающих абсорбционных тепловых насосах может быть использован водный раствор соли LiCl. Этот абсорбент по сравнению с раствором LiBr обладает меньшей коррозионной активностью и существенно дешевле в производстве. Однако LiCl обладает существенно меньшей растворимостью по сравнению с LiBr, что приводит к ограниченному применению LiCl для выработки холода. Например, при получении для систем кондиционирования холодной воды с температурой 5...7 °С с отводом теплоты абсорбции с температурой 26...29 °С в градирни оросительного типа уровень концентраций водного раствора LiCl приближается к опасной зоне кристаллизации.

Однако в тепловых насосах температурные уровни охлажденной и охлаждающей (нагреваемой) жидкостей существенно выше по сравнению с холодильными машинами, что уже принципиально не ограничивает применение в качестве абсорбента водных растворов соли LiCl. В работах [11, 12] утверждается, что эффективность рабочего цикла с абсорбентом на основе LiCl даже несколько выше, чем для LiBr. Учитывая вышеизложенное, практический интерес для утилизации геотермального тепла представляют простые оценки сравнительной энергетической эффективности рабочих циклов тепловых насосов с использованием в качестве рабочих тел водных растворов LiCl и LiBr.

На рис. 5 приведен теоретический цикл повышающего теплового насоса в диаграмме Дюринга для раствора LiCl, на основе данных работы [14]. При его построении были учтены ключевые параметры цикла для водного раствора LiBr: температуры геотермальной воды на входе в испаритель и генератор, в конденсаторе, испарителе, слабого раствора на выходе из абсорбера и крепкого – на выходе из генератора (десорбера).

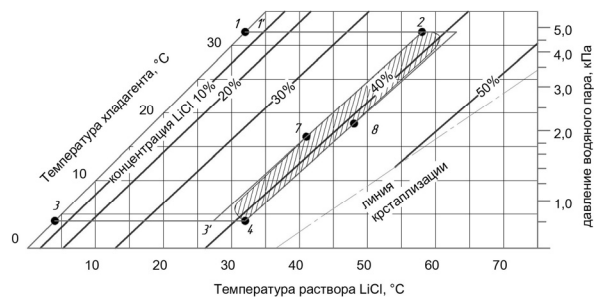


Рис. 5 – Теоретический цикл повышающего абсорбционного теплового насоса с одноступенчатыми абсорбцией и десорбцией в диаграмме Дюринга для водного раствора LiCl при температуре геотермальной воды на входе 40 °С

Fig. 5 – A theoretical cycle of a boost absorption heat pump with single-stage absorption and desorption in the Dühring diagram for an LiCl aqueous solution at an inlet temperature of geothermal water of 40 °С

При одинаковых на рис. 3 и 5 площадях заштрихованных областей, величина которых отражает энергетическую эффективность циклов, можно видеть, что цикл с LiCl выгодно отличается от LiBr более широкой зоной дегазации: соответственно 3,4 и 2,7 % при концентрациях крепких растворов 41 и 53,7 %. Согласно (2) это позволяет значительно уменьшить кратность циркуляции.

С другой стороны, для практического применения важной характеристикой является также абсорбирующая способность рабочих растворов, которая зависит от величины растворимости соли в воде. Экспериментальные исследования авторов [13] показали, что интенсивность абсорбции у водных растворов LiBr выше, чем у LiCl. Следствием этого может стать относительное увеличение поверхности теплообмена абсорбера, что отразится на технико-экономических показателях тепловых машин, работающих на водных растворах чистой соли LiCl. Однако этот недостаток может быть устранен благодаря использованию многокомпонентных растворов на основе $\text{H}_2\text{O-LiCl}$, где в качестве добавок используются хлориды и нитраты щелочных, щелочно-земельных металлов и цинка [15]. Эти многокомпонентные системы представляются более перспективными, чем смеси солей на основе $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ из-за меньшей дефицитности хлоридов и нитратов, более низкой их стоимости, меньшей коррозионной активности и большей термической устойчивости. Данные о более высокой растворимости в области высоких температур многокомпонентных водных растворов на основе LiCl, таких как LiCl-CsCl и LiCl-LiNO₃ [15], дают основания рассчитывать на хорошие перспективы применения этой соли в повышающих абсорбционных тепловых насосах для эффективной утилизации теплоты геотермальных источников для нужд децентрализованного отопления и ГВС в регионах с холодным климатом.

Заключение

Результаты расчетов, по определению эффективности теоретических циклов повышающих АБТН свидетельствуют о принципиальной возможности эффективного использования теплоты геотермальных источников с температурой 40...45 °С для нагрева теплоносителя систем отопления и ГВС, по крайней мере, до 55...63 °С. При этом для нагрева может быть использовано менее половины исходного потенциала теплоты геотермального источника ($\alpha = 0,46...0,47$) при максимально возможном значении $\alpha = 0,5$ для этого типа тепловых насосов [6].

Принципиально важным является то, что в отличие от ПКТН и понижающих АБТН в повышающих АБТН процесс нагрева теплоносителя системы теплоснабжения осуществляется непосредственно за счет части тепловой энергии самого геотермального источника с небольшими затратами электроэнергии для работы растворных насосов и системы автоматики (6...8 кВт на каждый 1,0 МВт полезно выработанного тепла для нужд теплоснабжения).

При определенных условиях в качестве абсорбента в повышающем абсорбционном тепловом насосе могут быть использованы водные растворы соли LiCl. Однако по причине сравнительно меньшей, чем у чистой соли LiBr растворимости в воде, при одинаковых показателях энергоэффективности их теоретических циклов для этого потребуется дополнительное увеличение поверхности теплообмена абсорбера.

Одним из главных препятствий при теоретическом определении сравнительной энергоэффективности перспективных абсорбционных тепловых насосов повышающего типа является недостаточная точность теоретических расчетов свойств одно- и многокомпонентных растворов в области высоких температур и концентраций [15]. Это делает актуальным проведение комплексных экспериментальных исследований на пилотных установках геотермальной энергетики с фиксированными поверхностями теплообмена рабочих аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геотермическая карта России. – URL: <https://www.geokniga.org/maps/1009> (дата обращения: 08.09.2023).
2. Геотермальные ресурсы России. – URL: <https://geographyofrussia.com/geothermalnye-resursy-rossii/> (дата обращения: 08.09.2023).
3. Горячий источник пос. Белый Яр. – URL: http://blog.kob.tomsk.ru/wiki/index.php?title=Горячий_источник_пос._Белый_Яр (дата обращения: 08.09.2023).
4. Целебные источники. – URL: <https://fanatbaikala.ru/portfolio-view/mineralnye-istochniki> (дата обращения: 08.09.2023).
5. Постановление Госстроя РФ от 27 сентября 2003 г. № 170 «Об утверждении Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда». – URL: <https://base.garant.ru/12132859/> (дата обращения: 08.09.2023).
6. Абсорбционные преобразователи теплоты: монография / А.В. Бараненко, Л.С. Тимофеевский, А.В. Долотов, А.В. Попов. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 338 с.
7. **Cudok F., Giannetti N.** Absorption heat transformer – state-of-the-art of industrial applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 141. – P. 110757. – DOI: 10.1016/j.rser.2021.110757.
8. **Дзино А.А., Малинина О.С.** Оценка влияния температуры греющего источника на энергетическую эффективность одноступенчатых циклов абсорбционных термотрансформаторов // *Омский научный вестник. Серия: Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 33–39. – DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-3-33-39.
9. Experimental study of negative temperatures in lithium-bromide absorption refrigerating machines / K.I. Stepanov, D.G. Mukhin, S.V. Alekseenko, O.V. Volkova // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2015. – Vol. 22 (4). – P. 481–489. – DOI: 10.1134/S0869864315040095.
10. ASHRAE Handbook of Fundamentals. – Atlanta, 1997.
11. Thermodynamic evaluation of LiCl-H₂O and LiBr-H₂O absorption refrigeration systems based on a novel model and algorithm / J. Ren, Z. Qian, Z. Yao, N. Gan, Y. Zhang // *Energies*. – 2019. – Vol. 12. – P. 3037. – DOI: 10.3390/en12153037.
12. Energy analysis of lithium bromide-water and lithium chloride-water based single effect vapour absorption refrigeration system: A comparison study/ T. Ahmad, Md. Azhar, M.K. Sinha, Md. Meraj, I.M. Mahbubul, A. Ahmade // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2022. – Vol. 7. – P. 100432. – DOI: 10.1016/j.clet.2022.100432.
13. **Kim K.J., Ameel T.A., Wood B.D.** Performance evaluations of LiCl and LiBr for absorber design applications in the open-cycle absorption refrigeration system // *Journal of Solar Energy Engineering*. – 1997. – Vol. 119 (2). – P. 165–173. – DOI: 10.1115/1.2887898.
14. **Conde-Petit M.R.** Aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: Property formulations for use in air conditioning equipment design. – Zurich, Switzerland: M. Conde Engineering, 2014. – 29 p. – URL: <http://www.mrc-eng.com/Downloads/Aqueous%20LiCl&CaCl2%20Solution%20Props.pdf> (accessed: 08.09.2023).
15. Водные растворы абсорбционных термотрансформаторов: монография / А.В. Бараненко, С.В. Караван, О.А. Пинчук, Д.В. Караван. – СПб.: Страта, 2019. – 414 с. – (Основы энергосбережения).

**EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE USE OF BOOSTER-TYPE
ABSORPTION HEAT PUMPS FOR HEAT SUPPLY BASED
ON MEDIUM-TEMPERATURE GEOTHERMAL SOURCES**

**Alekseenko S.V.², Mukhin D.G.^{1,2}, Stepanov K.I.²,
Elistratov S.L.^{1,2}, Mironova N.V.¹**

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

²*S.S. Kutateladze Institute of Thermal Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

On the territory of the Russian Federation, there are a large number of geothermal heat sources with a low, no more than 50 °C, temperature potential, on the basis of which it is possible to create environmentally friendly heat supply systems using heat pumps. Efficiency assessments

were made for the use of boost-type absorption heat pumps for these purposes, in which a geothermal or technogenic heat source with a temperature of 40...45 °C is theoretically capable of providing heating of the heat carrier of the heat supply system to 55...63 °C in winter at specific costs of electrical energy for the operation of circulation pumps, automation and control systems - not more than 1.0 % of their useful heat output. The ambient air with negative temperatures sufficient to lower the temperature of the coolant to minus 4°C was considered as a cooling medium. The range of calculated values of the heat transformation coefficients for the considered conditions was $\alpha = 0.46...0.47$. An analysis of the comparative advantages and disadvantages of using aqueous solutions of LiBr and LiCl salts as working bodies was carried out, on the basis of which the prospects for using the LiCl salt aqueous solutions in absorption heat pumps of a boosting type were shown.

Keywords: geothermal heat source, heating and hot water supply, boost-type absorption heat pump, aqueous solutions of lithium bromide and chloride

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-3-46-58

REFERENCES

1. *Geothermal map of Russia*. (In Russian). Available at: <https://www.geokniga.org/maps/1009> (accessed 08.09.2023).
2. *Geothermal resources of Russia*. (In Russian). Available at: <https://geographyofrussia.com/geotermalnye-resursy-rossii/> (accessed 08.09.2023).
3. *Goryachii istochnik pos. Belyi Yar* [Hot spring of the village Bely Yar]. Available at: http://blog.kob.toms.ru/wiki/index.php?title=Горячий_источник_пос._Белый_Яр (accessed 08.09.2023).
4. *Tselebnye istochniki* [Healing springs]. Available at: <https://fanatbaikala.ru/portfolio-view/mineralnye-istochniki> (accessed 08.09.2023).
5. Decree of the Gosstroy of the Russian Federation of September 27, 2003 No. 170 "On approval of the Rules and norms for the technical operation of the housing stock". (In Russian). Available at: <https://base.garant.ru/12132859/> (accessed 08.09.2023).
6. Baranenko A.V., Timofeevskii L.S., Dolotov A.V., Popov A.V. *Absorbtsionnye preobrazovateli teploty* [Absorption heat converters]. St. Petersburg, SPbGUNIPT Publ., 2005. 338 p.
7. Cudok F., Giannetti N. Absorption heat transformer – state-of-the-art of industrial applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 141, p. 110757. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110757.
8. Dzino A.A., Malinina O.S. Otsenka vliyaniya temperatury greyushchego istochnika na energo-ticheskuyu effektivnost' odnostupenchatykh tsiklov absorbtsionnykh termotransformatirov [Estimation of the influence of heating source temperature on energy efficiency of single-stage absorption thermal transformer cycles]. *Omskii nauchnyi vestnik. Seriya: Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroyeniye* = *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*, 2019, vol. 3, no. 3, pp. 33–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-3-33-39.
9. Stepanov K.I., Mukhin D.G., Alekseenko S.V., Volkova O.V. Experimental study of negative temperatures in lithium-bromide absorption refrigerating machines. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 481–489. DOI: 10.1134/S0869864315040095.
10. *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. Atlanta, 1997.
11. Ren J., Qian Z., Yao Z., Gan N., Zhang Y. Thermodynamic evaluation of LiCl-H₂O and LiBr-H₂O absorption refrigeration systems based on a novel model and algorithm. *Energies*, 2019, vol. 12, p. 3037. DOI: 10.3390/en12153037.
12. Ahmad T., Azhar M., Sinha M.K., Meraj M., Mahbubul I.M., Ahmade A. Energy analysis of lithium bromide-water and lithium chloride-water based single effect vapor absorption refrigeration system: A comparison study. *Cleaner Engineering and Technology*, 2022, vol. 7, p. 100432. DOI: 10.1016/j.cell.2022.100432.
13. Kim K.J., Ameel T.A., Wood B.D. Performance evaluations of LiCl and LiBr for absorber design applications in the open-cycle absorption refrigeration system. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1997, vol. 119 (2), pp. 165–173. DOI: 10.1115/1.2887898.

14. Conde-Petit M.R. *Aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: Property formulations for use in air conditioning equipment design*. Zurich, Switzerland, M. Conde Engineering, 2014. 29 p. Available at: <http://www.mrc-eng.com/Downloads/Aqueous%20LiCl&CaCl2%20Solution%20Props.pdf> (accessed 08.09.2023).
15. Baranenko A.V., Karavan S.V., Pinchuk O.A., Karavan D.V. *Vodnye rastvory absorbtionnykh termotransformatorov* [Aqueous solutions of absorption thermotransformers]. St. Petersburg, Strata Publ., 2019. 414 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Алексеев Сергей Владимирович – родился в 1950 году, д-р физ.-мат. наук, профессор, академик РАН, научный руководитель, Институт теплофизики СО РАН. Область научных интересов: волновые явления и процессы переноса в двухфазных средах, жидкие пленки и ривулеты, вихревые и когерентные структуры, турбулентные струи, экспериментальные методы, моделирование аэродинамики в топочных камерах, термическая переработка отходов, энергосберегающие технологии. Опубликовано 400 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1. E-mail: asvasus@yandex.ru).

Alekseenko Sergey Vladimirovich (b. 1950) – Doctor of Sciences (Phys. & Math.) of science, professor, academician, scientific head, Institute of Thermophysics. His research interests are currently focused on Wave phenomena and transfer processes in two-phase media, Liquid films and rivulets, Vortical and coherent structures, Turbulent jets, Experimental methods, Modeling of aerodynamics in furnaces, Thermal waste treatment, Energy saving technologies. He is author of 400 scientific papers. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: asvasus@yandex.ru).



Мухин Дмитрий Геннадьевич – родился в 1979 году, аспирант, кафедра ТЭС, НГТУ. Область научных интересов: абсорбционные тепловые насосы и холодильные машины, энергосбережение, вакуумные выпарные установки, аппараты мгновенного вскипания. Опубликовано 22 научные работы. (Адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: mukhindg@mail.ru).

Mukhin Dmitry Gennadievich (b. in 1979) – post-graduate student, Department of «Thermal Power Stations», NSTU, NSTU. Research interests: absorption heat pumps and chillers, energy saving, vacuum evaporators, flashing devices. Published 22 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: mukhindg@mail.ru).



Степанов Константин Ильич – родился в 1986 году, канд. техн. наук, главный инженер, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН). Область научных интересов: абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы, энергосбережение, вакуумные выпарные установки, аппараты мгновенного вскипания, теплообменное оборудование, теплоассоциация. Опубликовано 19 научных работ. (Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1. E-mail: stepanov_ki@mail.ru).

Stepanov Konstantin Ilyich (b. in 1986) – Candidate of Sciences (Eng.), Chief Engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IT SB RAS). Research interests: absorption refrigeration machines and heat pumps, energy saving, vacuum evaporators, flashers, heat exchange equipment, heat and mass transfer. Published 19 scientific papers. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: stepanov_ki@mail.ru).



Елистратов Сергей Львович – родился в 1954 году, д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра ТЭС, НГТУ. Область научных интересов: теплоэнергетика, тепловые насосы, энергосбережение, термодинамика, тепломассообмен. Опубликовано 153 научные работы. (Адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20. E-mail: elistratov.sl@yandex.ru).

Elistratov Sergey Lvovich (b. in 1954), Doctor of Sciences (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of «Thermal Power Stations», NSTU. Research interests: thermal power engineering, heat pumps, energy saving, thermodynamics, heat and mass transfer. Published 153 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: elistratov.sl@yandex.ru).



Миронова Нина Владимировна – старший преподаватель кафедры тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплоэнергетика, тепловые насосы, энергосбережение, термодинамика, тепломассообмен. Опубликовано 36 научных работ. (Адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20. E-mail: mironova.2013@corp.nstu.ru).

Mironova Nina Vladimirovna – Senior lecturer at the Department of Thermal Power Stations in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests include thermal power engineering, heat pumps, energy saving, thermodynamics, heat and mass transfer. Published 36 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: mironova.2013@corp.nstu.ru).

Статья поступила 30 июля 2023 г.
Received July 30, 2023

To Reference:

Alekseenko S.V., Mukhin D.G., Stepanov K.I., Elistratov S.L., Mironova N.V. Otsenka effektivnosti primeneniya absorbtionnykh teplovykh nasosov povyshayushchego tipa dlya teplosnabzheniya na osnove srednetemperaturnykh geotermal'nykh istochnikov [Evaluation of the efficiency of the use of booster-type absorption heat pumps for heat supply based on medium-temperature geothermal sources]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 3 (60), pp. 46–58. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-3-46-58.