

УДК 621.565.8

**АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ  
АБСОРБЦИОННЫХ БРОМИСТОЛИТИЕВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН  
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСЕРГИЧЕСКОГО ПОДХОДА  
И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Статья поступила в редакцию 04.12.2014, в окончательном варианте 19.02.2014.*

*Лазаренко Олег Олегович*, магистр техники и технологии, специалист, Астраханский региональный ресурсный центр, 414000, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Ленина, 20, e-mail: lazarx7@mail.ru

*Галимова Лариса Васильевна*, доктор технических наук, профессор, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: galimova\_lv@mail.ru

В мировой практике существует общий комплексный и многофакторный показатель эффективности эксплуатации оборудования ОЕЕ (Overall Equipment Effectiveness). Важнейшая составляющая этого показателя – энергоэффективность. Значительным резервом ее повышения в холодильной технике является разработка и применение абсорбционных термотрансформаторов. Для получения объективной оценки их энергоэффективности необходимо применение термодинамического анализа, обеспечивающего получение основных показателей процессов в абсорбционных бромистолитиевых холодильных машинах различных схем. Отметим также важность энтропийного и эксергетического анализа. Общей целью статьи является разработка методологии оценки термодинамической эффективности абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин (АБХМ) нового поколения в широком интервале изменения рабочих параметров. В рамках разработки создана программа, которая позволяет провести эту оценку и получить оптимальный вариант АБХМ для реальных режимов работы.

**Ключевые слова:** оценка эффективности, моделирование, термодинамическая эффективность, энергосбережение, абсорбционные холодильные машины, эксергия, анализ, энергоёмкость

**ANALYSIS AND MANAGEMENT OF ENERGOEFFICIENCY  
OF ABSORPTION LITHIUM BROMIDE REFRIGERATING UNITS  
ON THE BASIS OF EXERGETIC APPROACH AND SIMULATION MODELING**

*Lazarenko Oleg O.*, Master of Technics and Technology, specialist, Astrakhan Regional Resource Center, 20 Lenin St., Astrakhan, 414000, Russian Federation, e-mail: lazarx7@mail.ru

*Galimova Larisa V.*, D.Sc. (Engineering), Professor, Astrakhan State Technical University, Professor, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: galimova\_lv@mail.ru

In the world practice, there is a common and complex multifactorial indicator of the effectiveness of the equipment OEE (Overall Equipment Effectiveness). The major component of this indicator is the energy efficiency. Its significant reserve increase is in the refrigeration technology development and application of absorption thermotransformers. For qualitative assessment the use of thermodynamic analysis is required to ensure quality characteristics obtaining. These methods include entropy and exergy analysis. Thermodynamic analysis makes it possible to obtain the basic indicators of the processes in the various absorption lithium bromide refrigeration machines schemes. The overall objective of the work is to develop a methodology for assessing the thermodynamic efficiency of absorption lithium bromide refrigeration machines (ALBRM) of new a generation over a wide range of operating parameters. As the results for this work a program has been written that allows one to conduct this assessment and get the best option for real ALBRM operating modes.

**Keywords:** performance evaluation, modeling, thermo-dynamic efficiency, energy saving, absorption refrigeration machines, exergy analysis, energy consumption

Обеспечение энергоэффективности экономики России является важнейшей задачей, решение которой необходимо для успешного социально-экономического развития страны. Эта задача носит комплексный характер и включает в себя, в частности, управление энергоэффективностью холодильных машин (ХМ). Ниже эти вопросы исследуются применительно к абсорбционным бромистолитиевым холодильным машинам (АБХМ).

**Общая характеристика актуальности и проблематики статьи.** Энергоемкость российской экономики существенно превышает в расчете по паритету покупательной способности аналогичный показатель в США, Японии, развитых странах Европейского Союза [8]. При этом Россия располагает масштабным недоиспользуемым потенциалом энергосбережения («бросовая» энергия). В отношении способности решать проблему обеспечения экономического роста страны этот потенциал сопоставим с приростом производства всех первичных энергетических ресурсов [12].

В мировой практике существует общий комплексный (многофакторный) показатель эффективности эксплуатации оборудования ОЕЕ (Overall Equipment Effectiveness.) Важнейшей составляющей этого показателя является энергоэффективность. Для ее оценки Международное энергетическое агентство предлагает использовать понятие «негативный ватт» как единицу измерения сэкономленного количества энергии. Однако общепризнанные подходы к оценке энергоэффективности пока отсутствуют [5]. В современных технологиях, связанных с преобразованием энергии и вещества, важное место занимают высокотемпературные и низкотемпературные системы различного назначения, в частности, теплоиспользующие холодильные машины. Их применение в технике направлено на решение проблемы энергосбережения.

Для оценки энергоэффективности теплоиспользующих холодильных машин в данной работе используется инженерный метод, сочетающий элементы системного подхода и экономики – он получил название эксергетического [2, 3, 4, 17]. В основу разработки методики исследования энергоэффективности абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин (АБХМ) приняты классические работы по использованию эксергетического анализа в науке и технике [4].

Использование в технике универсальной меры в виде эксергетического КПД позволяет определить степень термодинамического совершенства процессов, происходящих в системе в целом и каждом ее элементе в отдельности; производить сравнение и выбор различных термодинамических систем.

*Целью данной работы* было определение термодинамической эффективности АБХМ нового поколения в широком интервале изменения рабочих параметров; обеспечение сравнения и выбора необходимой системы теплотрансформаторов. Для достижения этой цели были выполнены следующие работы. (1) Создана комплексная модель и программа для определения значений эксергетических коэффициентов полезного действия (КПД) АБХМ нового поколения различных схем. (2) Проведены численные эксперименты для принятых условий работы АБХМ. Их результаты обработаны с целью получения зависимостей эксергетических показателей от основных режимных параметров эксплуатации установки. (3) На основании результатов экспериментов определены целесообразные направления совершенствования технологий использования АБХМ.

**Конструкции и принципы работы АБХМ.** На рис. 1 представлены наиболее распространенные схемы современных АБХМ нового поколения, разработанных ООО «ОКБ Теплосибмаш» [1]: а) холодильная машина с одноступенчатой генерацией раствора с паровым обогревом АБХМ-П; б) холодильная машина с одноступенчатой генерацией раствора с водяным обогревом АБХМ-В; в) холодильная машина с двухступенчатой генерацией раствора с паровым обогревом АБХМ2-П.

АБХМ предназначены для охлаждения воды и других жидких сред до температур от +5 до +15 °С. Источником энергии в машинах с одноступенчатой регенерацией раствора является водяной пар низкого давления 0,1–0,15 МПа (а) или горячая вода 90–115 °С (б). В машинах с двухступенчатой регенерацией раствора используется пар среднего давления 0,5–0,8 МПа (в), газообразное или жидкое топливо. Применяемые в АБХМ источники тепла могут быть вторичными.

АБХМ используются в системах центрального кондиционирования крупных объектов гражданского и производственного назначения, системах охлаждения технологического оборудования и обрабатываемой продукции в различных отраслях промышленности. Холодильные машины с огневым обогревом (на топливе) могут применяться для выработки тепла в системах отопления и горячего водоснабжения.

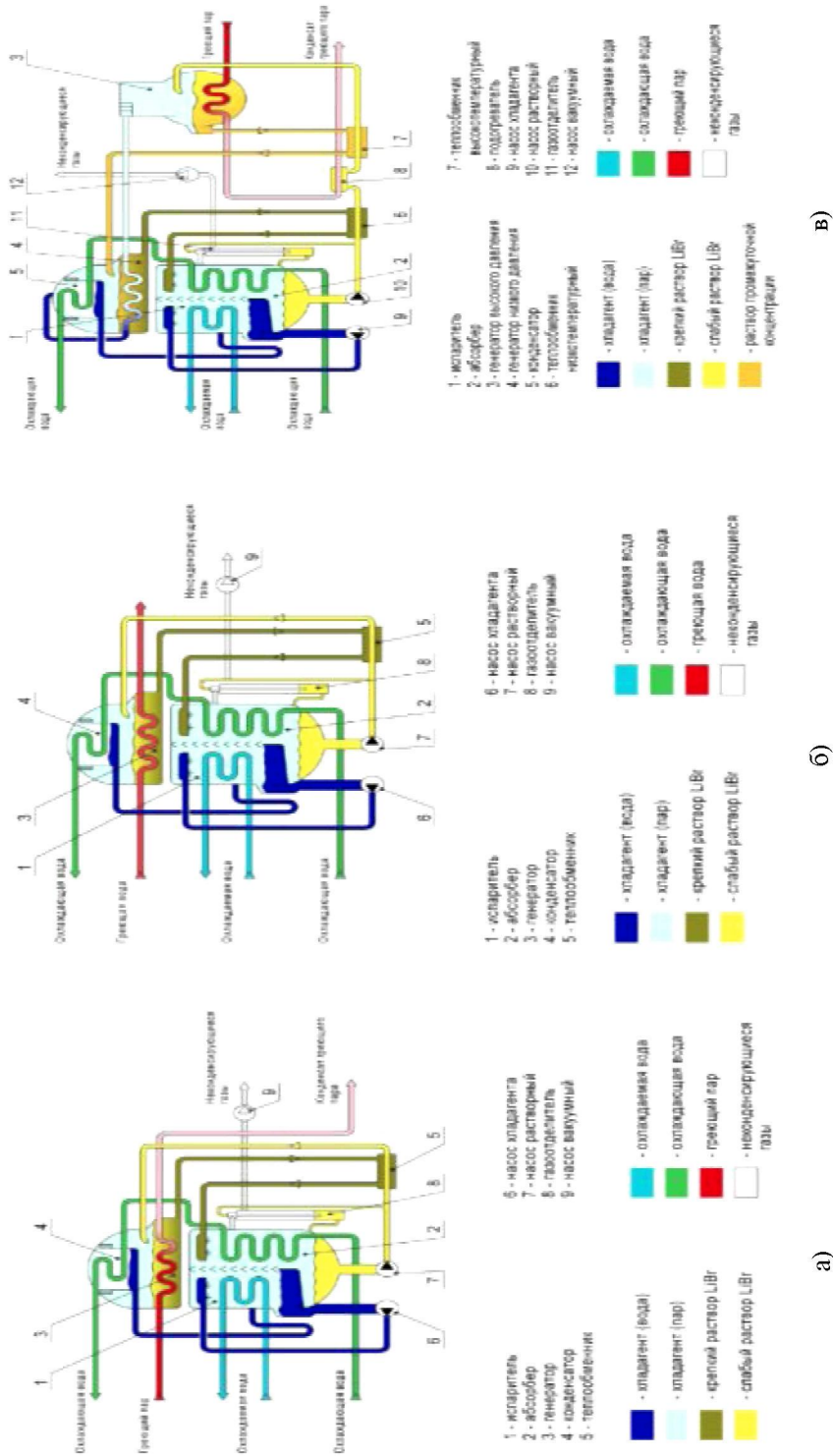


Рис. 1. Схемы абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин нового поколения

АБХМ с паровым и водяным обогревом имеют компактную моноблочную конструкцию. Машины с огневым обогревом состоят из двух блоков. Теплообменные поверхности аппаратов выполнены в виде горизонтальных пучков тонкостенных труб.

Работа АБХМ основана на способности водного раствора бромистого лития поглощать при низких температурах большое количество водяных паров. Машины представляют собой вакуум-водяные установки, в них поддерживается глубокий вакуум ( $6\div 8$  мм рт. ст.), при котором вода кипит при низких температурах.

Охлаждаемая вода поступает в трубное пространство испарителя, где охлаждается до необходимой температуры за счёт испарения хладагента – воды, стекающей в виде плёнки по наружным поверхностям труб испарителя. Для орошения трубного пучка испарителя используется циркуляционный насос хладагента.

Водяные пары с температурой  $2\text{--}4$  °С из испарителя поступают в межтрубное пространство абсорбера, где абсорбируются крепким (концентрированным) водным раствором бромистого лития, стекающим в виде плёнки по поверхностям труб. Теплота, выделяемая при абсорбции пара, отводится охлаждающей водой, протекающей в трубках абсорбера.

Поглощая пар хладагента, крепкий раствор бромистого лития становится слабым, его концентрация снижается. Этот слабый раствор стекает в поддон абсорбера, откуда насосом подаётся в трубное пространство растворного теплообменника. После подогрева в теплообменнике слабый раствор поступает в межтрубное пространство генератора. В генераторе слабый раствор бромистого лития упаривается за счёт теплоты греющей среды, поступающей в трубное пространство генератора.

Упаренный (крепкий) раствор из генератора поступает в межтрубное пространство регенеративного теплообменника, где охлаждается слабым раствором и далее направляется на орошение абсорбера.

Образующийся в генераторе водяной пар поступает в конденсатор, где конденсируется на внешней поверхности теплообменных труб. Конденсат пара (хладагент) через гидрозатвор поступает в испаритель. Теплота конденсации водяного пара отводится охлаждающей водой, протекающей через трубы конденсатора.

В двухступенчатых холодильных машинах упаривание раствора осуществляется в двух генераторах: высокотемпературном и низкотемпературном. Источником энергии для низкотемпературного генератора является пар хладагента, поступающий из высокотемпературного генератора. При этом расход энергии на получение холода по сравнению с одноступенчатыми машинами уменьшается на 4 %. Расход охлаждающей воды снижается на 25 % [1].

Определение степени термодинамического совершенства АБХМ проводилось на основе теплового и эксергетического анализа их конструктивно-технологических схем. При проведении анализа для сравнения были использованы результаты исследований и испытаний АБХМ-П, АБХМ-В и АБХМ2-П, проведённых на кафедре холодильных машин и низкопотенциальной энергетики СПбГУНиПТ и ООО «ОКБ ТЕПЛОСИБМАШ» г. Новосибирск.

**Постановка задачи и результаты имитационного моделирования.** С целью получения информации о степени термодинамического совершенства АБХМ различных схем в большом диапазоне изменения рабочих параметров авторами был использован метод имитационного моделирования. На рис. 2 представлена блок-схема методики комплексной оценки АБХМ нового поколения. Блок-схема состоит из пяти основных блоков. Первый и второй блоки представляют собой модель теплового и эксергетического расчёта АБХМ с одноступенчатой регенерацией раствора с паровыми водяным обогревом генератора. Третий и четвёртый блоки – модель теплового и эксергетического расчёта АБХМ с двухступенчатой регенерацией раствора с газовым обогревом генератора высокого давления. Пятый блок представляет собой сравнение результатов расчётов эксергетических КПД, полученных из предыдущих блоков. На основе такого сравнения дается рекомендация для использования той или иной схемы АБХМ в соответствующих условиях эксплуатации.

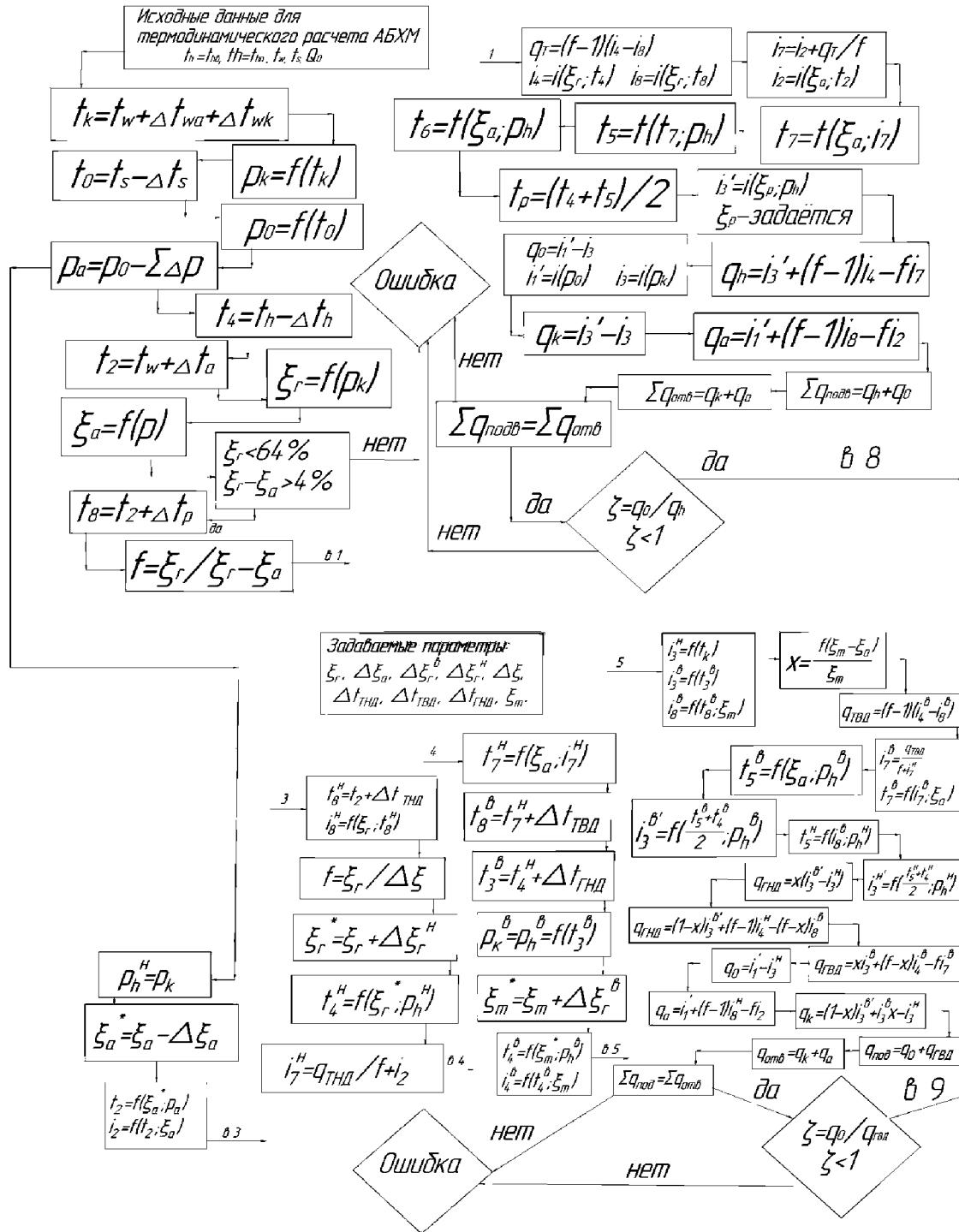


Рис. 2. Блок-схема алгоритма имитационного моделирования АБХМ (I)

В соответствии с блок-схемой разработаны конкретные расчетные формулы и программа на языке Visual Basic [9]. Это программное средство входит в состав Microsoft Visual Studio, распространяющейся бесплатно в рамках проекта Microsoft Dream Spark [20]. Выбор языка программирования VisualBasic был продиктован его простотой и возможностью быстрого создания программ для ПЭВМ, с операционной системой Microsoft Windows. Для проведения моделирования на данный момент этот язык программирования достаточен.

На рис. 2–3 представлена блок-схема алгоритма имитационного моделирования АБХМ. При составлении блок-схемы использовались стандартные обозначения и формулы для эксергетического расчета [18] и теплового расчета [6].

Эксергетический КПД холодильных машин определялся методом последовательного вычитания потерь в элементах машины от 100% введенной в генераторе эксергии.

Результаты численного эксперимента были обработаны и представлены в виде зависимостей эксергетического КПД от рабочих параметров АБХМ (рис. 4 и 5).

**Обсуждение результатов вычислительных экспериментов.** Интерпретация характера полученных зависимостей основана на классическом определении эксергии.

Как видно из первого графика (рис. 4а), с ростом температуры охлажденной воды эксергетический КПД снижается. Это объясняется тем, что с уменьшением разности между температурами охлажденной воды и окружающей среды при энтропии потока больше соответствующей энтропии окружающей среды термическая составляющая эксергии уменьшается, т.е. работоспособность потока падает.

Из второго графика (рис. 4б) видно, что с ростом температуры охлаждающей среды эксергетический КПД растет. Это объясняется тем, что при повышении температуры охлаждающей воды или температуры окружающей среды разность между температурой потока в испарителе и температурой окружающей среды растёт, что характеризует повышение работоспособности потока.

На третьем графике (рис. 4в) представлена зависимость эксергетического КПД от температуры греющего источника. В условиях работы генератора давление водяного пара ниже давления окружающей среды, но энтропия потока больше, чем энтропия пара при условиях окружающей среды. В этом случае наблюдается увеличение температурного перепада между температурой потока и окружающей среды. Однако при этом в большей степени сказывается влияние механической составляющей эксергии, связанной с разностью между давлениями в генераторе и окружающей среде. Поэтому, несмотря на увеличение разности температур, КПД снижается.

Сравнение полученных зависимостей выявило большую степень влияния температуры охлажденной воды, так как относительный интервал её изменения наибольший.

Характер зависимостей эксергетического КПД от рабочих параметров АБХМ с двухступенчатой генерацией объясняется теми же причинами.

Численно значения эксергетического КПД для АБХМ с двухступенчатой генерацией раствора отличаются от значений для одноступенчатых машин вследствие того, что эксергетическая температурная функция генератора меньше из-за более высокой температуры греющего источника. Характер зависимостей сохраняется, но в большей степени влияет температура охлаждающей среды.

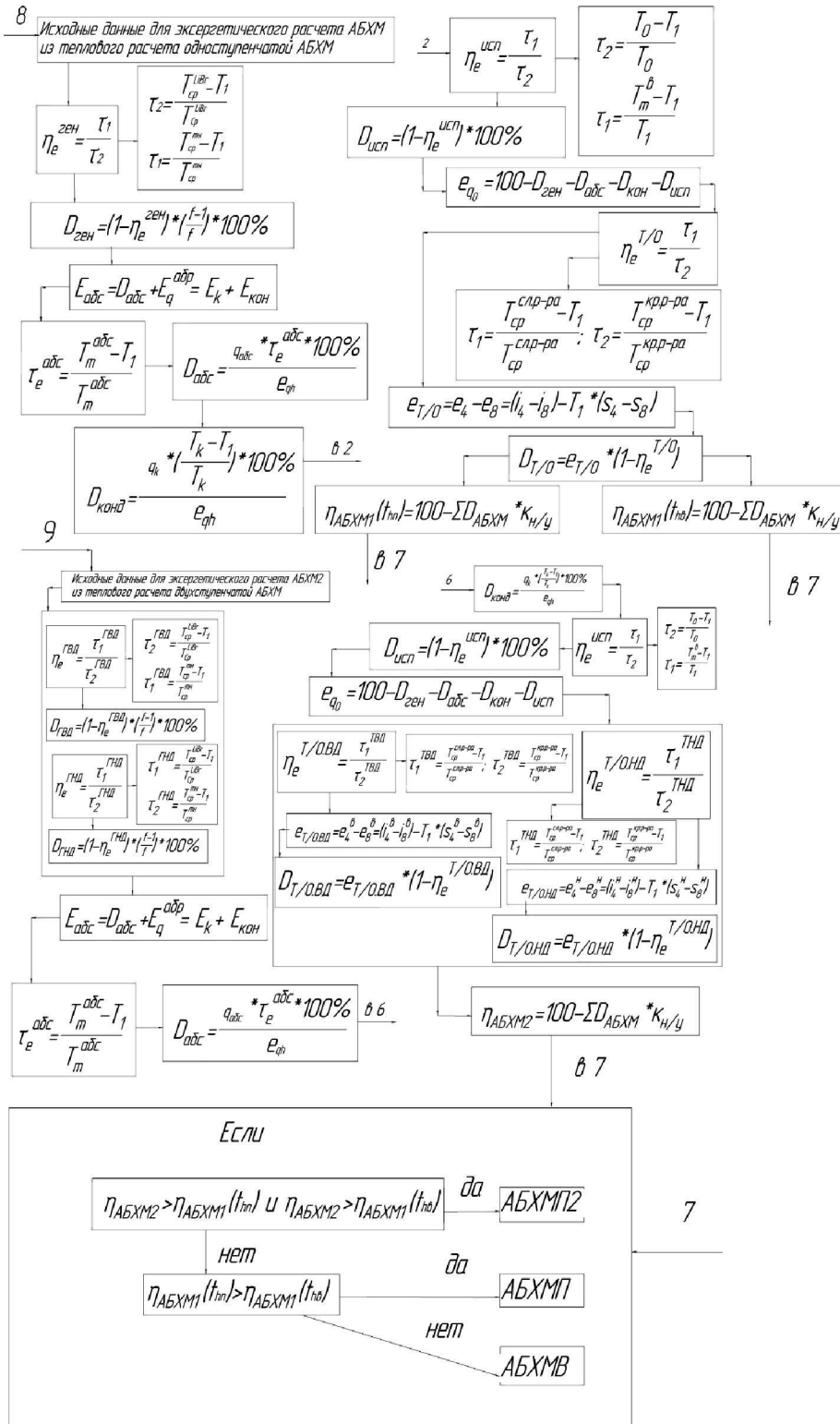


Рис. 3. Блок-схема алгоритма имитационного моделирования АБХМ (II)

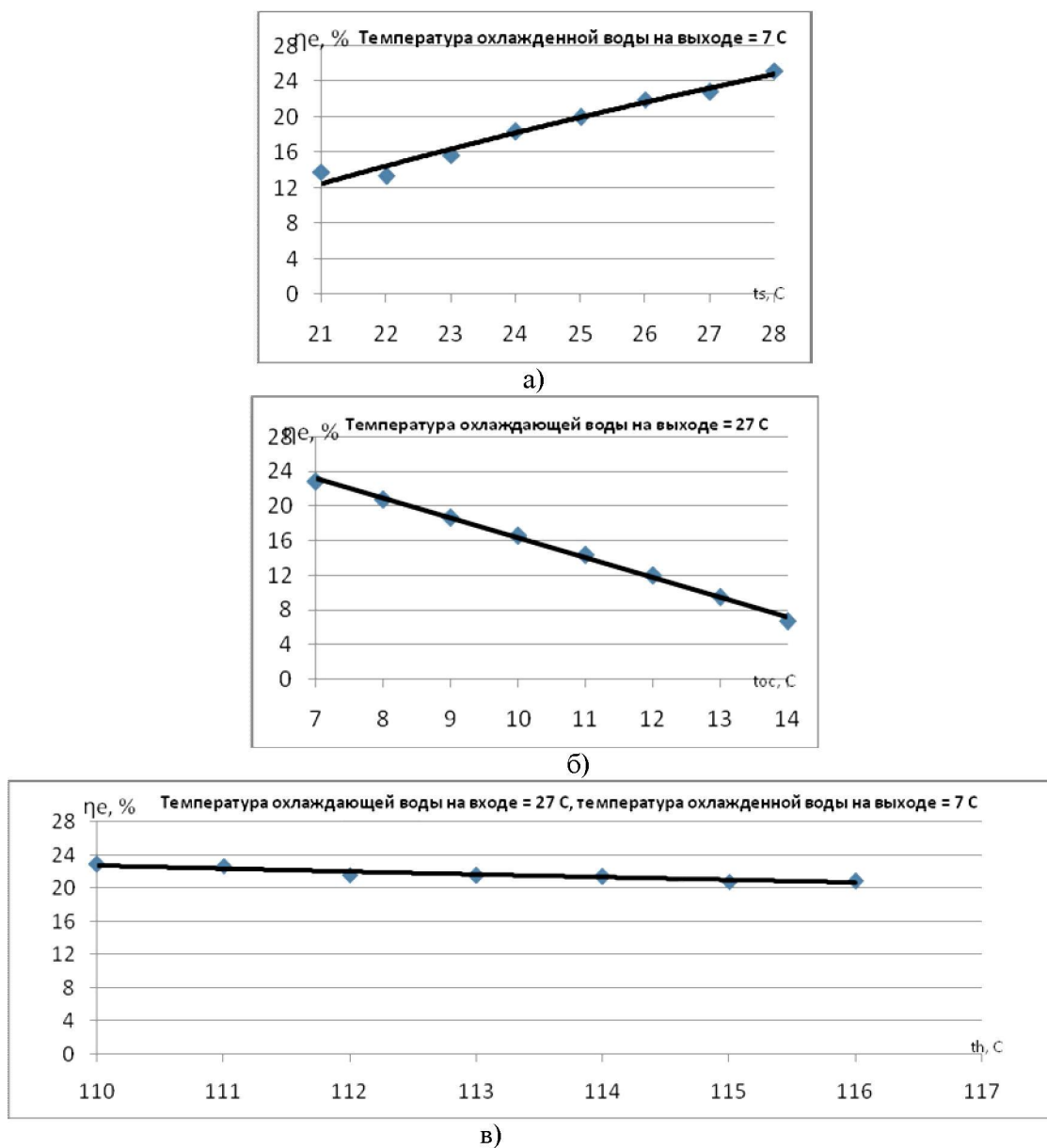


Рис. 4. Зависимости эксергетического КПД от основных рабочих параметров для АБХМ с одноступенчатой генерацией с паровым обогревом: а)  $t_s$  – температура охлажденной воды; б)  $t_{oc}$  – температура охлаждающей среды; в)  $t_h$  – температура греющего источника



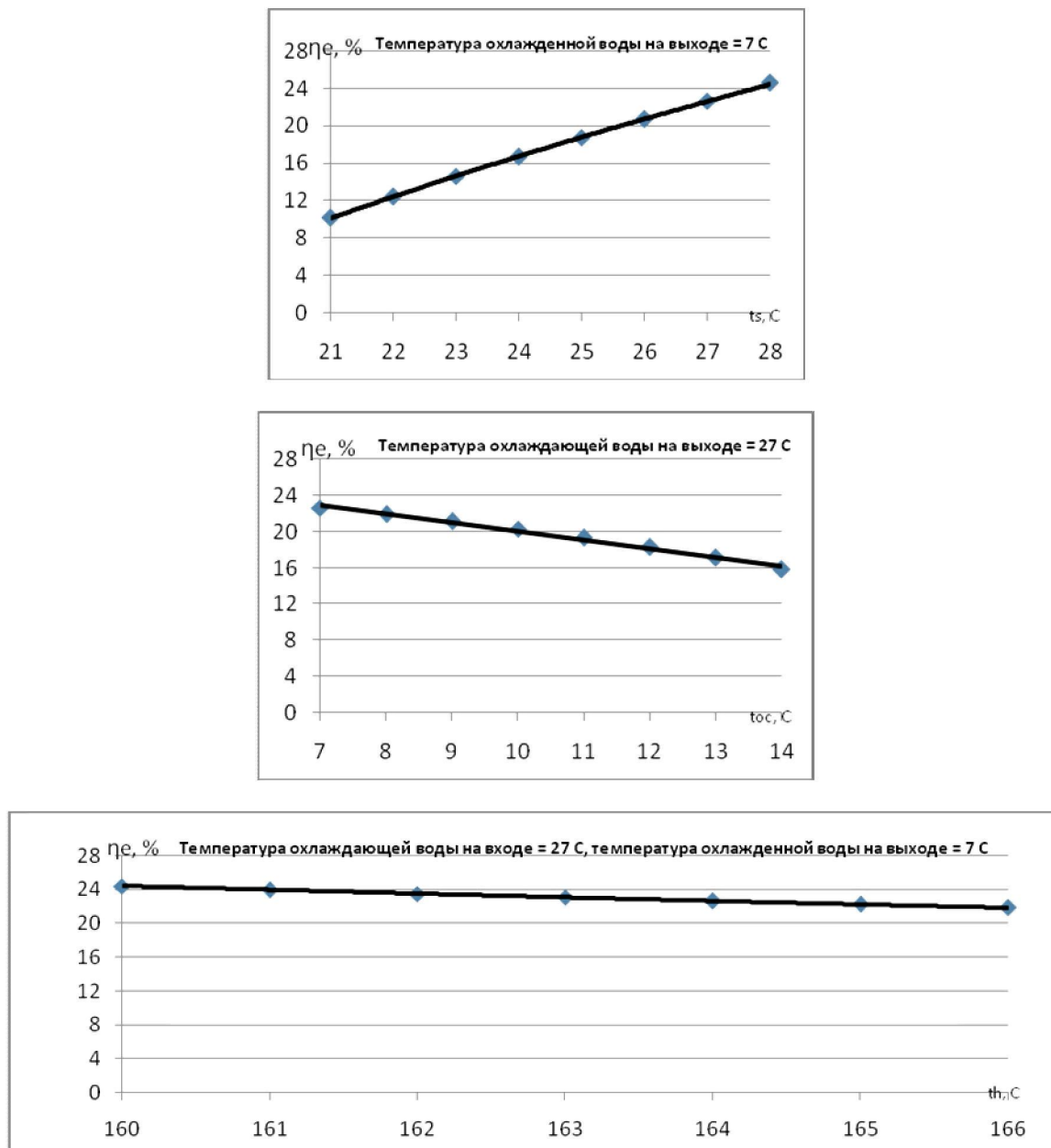


Рис. 5. Зависимости для АБХМ с двухступенчатой генерацией с паровым обогревом

Таким образом, на основании проведённого исследования можно заключить, что использование эксергетического метода анализа и математического моделирования процессов позволяет оценить степень термодинамического совершенства систем и возможность применения в технике «бросовых», недоиспользованных источников тепла для получения положительного технико-экономического эффекта. Предлагаемый метод исследования позволяет также расширить диапазон поиска конструктивных решений элементов АБХМ, в частности, с использованием более эффективных пластинчатых поверхностей.

**Список литературы**

1. Абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины // Каталог ОКБ «Теплосиб-маш». – Новосибирск, 2013. – 20 с.
2. Алберти Р. А. Преобразования Лежандра в химической термодинамике / Р. А. Алберти // Пьюр Эпл. Кем. – 2001. – № 73 (8). – С. 1349–1380.
3. Архаров А. М. Почему эксергетический вариант термодинамического анализа нерационален для исследования основных низкотемпературных систем / А. М. Архаров // Холодильная техника. – 2011. – № 10. – С. 8–13.
4. Бродянский В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – Москва : Энергоиздат, 1988. – 286 с.
5. Вотерс Ф. Показатель эффективности эксплуатации оборудования / Ф. Вотерс, Дж. Мэтот. – США : AVBInc., 2002. – 27 с.
6. Галимова Л. В. Абсорбционные холодильные машины : учеб. пос. / Л. В. Галимова. – Астрахань : Изд.-во АГТУ, 1997. – 226 с.
7. Гиббс Дж. В. Метод геометрического представления термодинамических свойств веществ посредством поверхностей. – Коннектикут : Академия искусств и наук, 1873. – С. 382–404.
8. Государственная программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности на период до 2020 года. – Режим доступа: <http://news.sfu-kras.ru/node/7289> (дата обращения 12.05.2013), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
9. Демидова Л. А. Программирование в среде VBA / Л. А. Демидова, А. Н. Пылькин. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2004. – 176 с.
10. Динсер Л. Концепции энергии, энтропии и эксергии и их роли в тепловой инженерии / Л. Динсер, У. А. Сенгел // Энтропия. – 2001. – № 3 (3). – С. 116–149.
11. Калнинь И. М. Энергоэффективность и экологическая безопасность холодильных систем / И. М. Калнинь // Холодильная техника. – 2008. – № 3. – С. 12–14.
12. Макейкина С. М. Необходимость повышения энергоэффективности экономики России в условиях модернизации инновационного развития / С. М. Макейкина, С. С. Лёшин // Общество: политика, экономика, право. – 2013. – № 1. – С. 21–24.
13. Министерство энергетики Российской Федерации. Отрасль. – Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/activity/energoeffektivnost/branch/> (дата обращения 09.10.2013), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
14. Перрот П. От А до Я в термодинамике / П. Перрот. – Оксфорд : Оксфорд Университи Пресс, 1998.
15. Рукавишников А. М. Энергетическая эффективность сегодня – экономический выигрыш завтра / А. М. Рукавишников, М. В. Литовченко // Холодильная техника. – 2012. – № 5. – С. 9–14.
16. Сан Дж. У. Эксергетический анализ солнечной осушающей холодильной установки / Дж. У. Сан, З. Лаван, У. М. Ворец и др. // Труды Американского раздела Международного общества солнечной энергии. – 1982. – С. 567–572.
17. Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Дж. Тсатсаронис. – Одесса : Студия «Негоциант», 2002. – С. 152.
18. Шаргут Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – Москва : Энергия, 1968. – 280 с.
19. Энергоэффективная Россия, многофункциональный общественный портал. – Режим доступа: <http://energoser.info/index.php> (дата обращения 06.09.2013), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
20. Microsoft Dreamspark. – Режим доступа: <http://www.dreamspark.com/default.aspx> (дата обращения 10.11.2013), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.

**References**

1. Absorbtsionnye bromistolitievye kholodilnye mashiny [Lithium bromide absorption refrigerating units]. *Katalog OKB «Teplosibmash»* [OKB "Teplosibmash" Catalogue]. Novosibirsk, 2013. 20 p.
2. Alberti R. A. Preobrazovaniya Lezhandra v khimicheskoy termodinamike [Legendre transformations in chemical thermodynamics]. *Puur Appl. Kem.* [Pure Appl. Chem.], 2001, no. 73 (8), pp. 1349–1380.

3. Arkharov A. M. Pochemu eksergeticheskiy variant termodinamicheskogo analiza neratsionalen dlya issledovaniya osnovnykh nizkotemperaturnykh sistem [Why is the exergetic option of thermodynamic analysis irrational to research the main low-temperature systems]. *Kholodilnaya tekhnika* [Refregiration], 2011, no. 10, pp. 8–13.
4. Brodyanskiy V. M., Fratsher V., Mikhalek K. *Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya* [Exergetic method and its applications]. Moscow, Energoizdat, 1988. 286 p.
5. Voters F., Metot Dzh. *Pokazatel effektivnosti ekspluatatsii oborudovaniya* [Indicator of equipment efficiency]. USA, ABBInc., 2002. 27 p.
6. Galimova L. V. *Absorbtsionnye kholodilnye mashiny* [Absorption refrigeration machines]. Astrakhan, Astakhan State Technical University Publ., 1997. 226 p.
7. Gibbs Dzh. V. *Metod geometricheskogo predstavleniya termodinamicheskikh svoystv veshchestv posredstvom poverkhnostey* [A method of geometrical representation of thermodynamic properties of substances by means of surfaces]. Connecticut, 1873, pp. 382–404.
8. State Program on Energy Conservation and Energy Efficiency for the Period up to 2020. Available at: <http://news.sfu-kras.ru/node/7289> (accessed 12 May 2013). (In Russ.)
9. Demidova L. A., Pylkin A. N. *Programmirovaniye v srede VBA* [Programming in VBA]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2004. 176 p.
10. Department of Mechanical Engineering, KFUPM. Dinser L., Sengel U. A. Kontseptsii energii, entropii i eksergii i ikh roli v teplovooy inzhenerii [Energy, entropy, and exergy concepts and their roles in thermal engineering]. *Entropiya* [Entropy], 2001, no. 3 (3), pp. 116–149.
11. Kalnin I. M. Energoeffektivnost i ekologicheskaya bezopasnost kholodilnykh sistem [Energy efficiency and environmental safety of refrigeration systems]. *Kholodilnaya tekhnika* [Refregiration], 2008, no. 14, pp. 12–14.
12. Makeykina S. M., Leshin S. S. Neobkhodimost povysheniya energoeffektivnosti ekonomiki Rossii v usloviyakh modernizatsii innovatsionnogo razvitiya [The need to improve the energy efficiency of the Russian economy in the modernization of innovative development]. *Obshchestvo: politika, ekonomika, pravo* [Society: Politics, Economics, Law], 2013, no. 1, pp. 21–24.
13. Ministry of Energy of the Russian Federation. Industry. Available at <http://minenergo.gov.ru/activity/energoeffektivnost/branch/> accessed 9 October 2013).
14. Perrot P. *Ot A do Ya v termodinamike* [From A to Z in thermodynamics]. Oxford, Oxford University Press, 1998.
15. Rukavishnikov A. M., Litovchenko M. V. Energeticheskaya effektivnost segodnya – ekonomicheskii vyigrysh zavtra [Energy efficiency today – an economic gain tomorrow]. *Kholodilnaya tekhnika* [Refregiration], 2012, no. 5, pp. 9–14.
16. San Dzh. U., Lavan Z., Vorek U. M. et al. Eksergeticheskiy analiz solnechnoy osushayushchey kholodilnoy ustanovki [Exergetic analysis of solar powered desiccated refrigeration unit]. *Trudy Amerikanskogo razdela Mezhdunarodnogo obshchestva Solnechnoy energii* [Proceedings of the American Section of the International Society of Solar Energy], 1982, pp. 567–572.
17. Studia "Negociant". Tsatsaronis Dzh. Vzaimodeystvie termodinamiki i ekonomiki dlya minimizatsii stoimosti energopreobrazuyushchey sistemy [Interaction of thermodynamics and economics in order to minimize the cost of energy conversion system]. Odessa, Studiya «Negotsiant», 2002, p. 152.
18. Shargut Ya., Petela R. Eksergiya [Exergy]. Moscow, Energiya, 1968. 280 p.
19. Energy efficient Russia, multifunctional public portal. Available at: <http://energosber.info/index.php> (accessed 6 September 2013). (In Russ.)
20. Microsoft Dreamspark. Available at: <https://www.dreamspark.com/default.aspx> (accessed 10 November 2013). (In Russ.)