

DOI: <https://doi.org/10.17816/Rf321629>

Методы анализа энергоэффективности холодильных установок

М.С. Талызин

Международная Академия Холода, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Системы холодоснабжения занимают ведущее место во многих отраслях промышленности. Их совершенствование в настоящее время связано с двумя основными направлениями: энергосбережение и экология.

Проблемам энергосбережения уделяется большое внимание, как на государственном уровне (Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»), так и собственниками холодильного оборудования.

Затраты электроэнергии, потребляемой системами холодоснабжения, составляют значительную часть, как в общем балансе энергопотребления предприятия (для предприятий общественного питания она составляет от 48% до 60%), так и в общем энергопотреблении страны (например, доля энергопотребления систем кондиционирования в странах Европы составляет от 2% до 6%).

Наряду с этим, ратифицирование Российской Федерацией Монреальского (Постановление № 539 правительства РФ от 27 августа 2005 г.) и Киотского (ФЗ 128-ФЗ от 4 ноября 2004 г.) протоколов, вступление в силу Европейских норм 517/2014, регламентирующих вывод из обращения хладагентов с потенциалом глобального потепления GWP выше 2500, например, R404A и R507A, активно применяемых в настоящее время, а также принятие Российской Федерацией нового экологического законодательства в связи с подписанием Парижского соглашения, ведет к необходимости применения новых хладагентов, которые не всегда оказываются эффективнее традиционно применяемых решений и требуют внесения изменений в технологическую схему холодильных систем.

Данные факторы ведут к необходимости совершенствования методик расчета эффективности, основанных на классических методах термодинамического анализа.

Ключевые слова: термодинамический анализ; энергетический метод термодинамического анализа; эксергетический метод термодинамического анализа; энтропийно-статистический метод термодинамического анализа.

Как цитировать:

Талызин М.С. Методы анализа энергоэффективности холодильных установок // Холодильная техника. 2021. Т. 110, № 1. С. 23–30.

DOI: <https://doi.org/10.17816/Rf321629>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF321629>

Energy-efficiency analysis methods for refrigeration plants

Maxim S. Talyzin

International Academy of Refrigeration, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Cold supply systems are significant in many industries. Their improvement is currently associated with two main areas: energy saving and ecology.

The problems associated with energy saving are paid considerable attention both at the state level (Federal Law No. 261-FZ "On Energy Saving and on Improving Energy Efficiency and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation") and by owners of refrigeration equipment.

The costs of electricity consumed by cold supply systems constitute a considerable part both in the total energy consumption of an enterprise (for catering enterprises, it ranges from 48% to 60%) and in the country's total energy consumption (for example, the share of energy consumption by air conditioning systems in Europe ranges from 2% to 6%).

Additionally, the ratification of the Montreal Protocol (Resolution No. 539 of the Government of the Russian Federation of 27.08.2005) and the Kyoto Protocol (FZ 128-FZ of November 4, 2004) by the Russian Federation, the entry of the Russian Federation into force of European Regulations 517/2014 governing the decommissioning of refrigerants with global warming potential above 2500 (for example, refrigerants R404A and R507A currently in active use), and the adoption of a new environmental legislation by the Russian Federation in connection with the signing of the Paris Agreement necessitates the need to use new refrigerants, which are not always more efficient than traditionally used solutions and require changes to their technological scheme.

Accordingly, we need to improve efficiency calculation methods based on classical methods of thermodynamic analysis.

Keywords: thermodynamic analysis; energy method of thermodynamic analysis; exergetic method of thermodynamic analysis; entropy and statistical method of thermodynamic analysis.

To cite this article:

Talyzin MS. Energy-efficiency analysis methods for refrigeration plants. *Refrigeration Technology*. 2021;110(1):23–30. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF321629>

Основы современной термодинамики были заложены Сади Карно [1]. Его труд «Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу» является классическим трудом термодинамики. В нем он сформулировал такие понятия, как обратимые и необратимые процессы, идеальный цикл, идеальная тепловая машина. В указанной работе [1] он показал возможность получения максимальной работы (максимального КПД) в идеальной тепловой машине.

Уникальность работы заключается в том, что, будучи приверженцем теории теплорода, Карно фактически сформулировал первый и второй законы термодинамики.

На основании идей Карно и Томсона, Рудольф Клаузиус в 50-х годах XIX века окончательно решил задачу взаимозависимости теплоты и работы. Им были сформулированы первое и второе начала термодинамики в современном их виде.

Р. Клаузиус первым сформулировал принцип возрастания энтропии в реальных процессах превращения энергии и ввел понятия суммарного приращения энтропии системы, назвав ее «потерей работоспособности» [2].

Кроме того, он сформулировал правило знаков для приращения энтропии: если приращения энтропии не требуют затрат работы, они считаются положительными, если же приращения не могут протекать самопроизвольно, то они считаются отрицательными.

Для любого обратимого цикла в едином термодинамическом пространстве, вне зависимости от направленности и свойств рабочего тела, интеграл по замкнутому контуру будет равен нулю:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0. \quad (1)$$

Величина $S = \int \frac{dQ}{T}$ была названа энтропией, из ко-

торой было дано выражение для теплоты $dQ = T \cdot dS$. Из соотношения (1) следует, что изменение энтропии между двумя состояниями рабочего тела одинаково и не зависит от характера процесса. Было показано, что энтропия является однозначной, непрерывной и конечной функцией параметров состояния и зависит только от них. Абсолютное значение энтропии не может быть определено, поэтому во всех расчетах фигурирует изменение энтропии при переходе из одного состояния в другое. Численное значение энтропии отсчитывается от какого-либо принятого начального состояния [1].

Понятие энтропии популярно описано в [3].

Эти понятия легли в основу методов термодинамического анализа, широко применяемых и сегодня – энтропийного и эксергетического.

Ж. Гюи [3] и А. Стодола [4] не зависимо друг от друга получили выражение для необратимых процессов, схожее с выражением Клаузиуса.

Уравнение Гюи-Стодола имеет следующий вид:

$$\Delta L = T_{oc} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta S_i, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^n \Delta S_i$ – суммарная величина производства эн-

тропии вследствие необратимости процессов во всех n подсистемах, T_{oc} – температура окружающей среды.

Оценка совершенства рабочего цикла и определение путей снижения энергетических затрат на достижение требуемого результата является целью термодинамического анализа энергетической установки.

Д.П. Гохштейном в работах [5] и [6] был предложен «энтропийный метод» расчета «потерь». Он предлагает из рассчитанной работы, вводимой в систему, вычитать все «потери», определяемые по отдельности. Такой подход позволяет количественно учесть переход вводимой в систему энергии в затраты на производство энтропии в каждом отдельно взятом узле системы.

А.С. Орлиным в публикации [7] было проведено исследование и анализ эффективности циклов двигателей внутреннего сгорания с учетом влияния степени сжатия и температуры рабочего вещества на степень термодинамического совершенства. Был произведен анализ потерь мощности, возникающих в процессе работы двигателя внутреннего сгорания, в зависимости от конструктивных и эксплуатационных факторов.

А.М. Архаров и В.В. Шишов (см. [8]) провели теоретическое исследование бесклапанного детандера с газовой смазкой. Для исследования использована методика, позволяющая исследовать расширительную машину, работающую по любому заданному циклу. Принималось во внимание производство энтропии, вызванное теплообменом между газом и стенкой в цилиндре, и использовались статистические данные повышения температуры за счет теплопритоков извне и трения в зависимости от частоты вращения. Указана зависимость для расчета адиабатного КПД с учетом потерь от смешения, впуска, теплообмена, дросселирования, натеков и трения.

А.М. Архаров, В.В. Шишов и И.К. Буткевич проанализировали потери холодопроизводительности гелиевого поршневого детандера от регенеративного теплообмена [9], [10], [11]. При анализе произведен расчет производства энтропии системы газ-стенка. Выявлены влияние параметров материала стенки, температурного уровня работы детандера на потерю от регенеративного теплообмена. Определена доля потерь от регенеративного теплообмена в общем балансе потерь (влияние на КПД детандера).

И.К. Буткевичем были проведены исследования криогенных гелиевых систем с учетом переходных процессов, произведен анализ основных видов потерь на характеристики криогенных гелиевых систем

(холодопроизводительность, степень термодинамического совершенства, удельные затраты энергии) [12].

В.С. Мартыновским описаны энтропийный и эксергетический методы оценки необратимости действительных термодинамических циклов тепловых двигателей и холодильных машин, приведен технико-экономический анализ различных тепловых схем, предложен общий метод сопоставления действительных прямых и обратных циклов [13].

Тиммерхаус (Timmerhaus) и Флинн (Flynn) [14] предлагают рассматривать обратимость процессов, происходящих в низкотемпературной системе, как меру ее термодинамического качества. Чтобы оценить обратимость процессов, необходимо определить величину увеличения (производства) энтропии, что для наглядности может быть выражено дополнительной работой, которую необходимо затратить на компенсацию производства энтропии за счет необратимости процессов.

Вывод теоремы Гюи-Стодоля применительно к холодильной технике произведен Колосовым М.А. в работах [15] и [16].

Т.В. Морозюк применил энтропийный метод для анализа циклов холодильных машин и тепловых насосов в [17].

В.М. Бродянским и др. [18] была разработана методика для анализа и оптимизации различных технических систем на базе эксергетического метода анализа, проведен анализ основных рабочих процессов, введены и обоснованы понятия транзитной эксергии, обобщенного коэффициента полезного действия и вторичных эксергетических ресурсов. Также приводятся методики технико-экономической оптимизации и распределения затрат.

Таким образом, при исследовании холодильных систем можно выделить три группы, основанные на энергетическом (первый закон термодинамики), эксергетическом и энтропийно-статистическом методах термодинамического анализа.

Первый закон термодинамики представляет собой закон сохранения и превращения энергии, поэтому, результаты, которые можно получить с его применением, не всегда могут дать представление о величинах и распределении потерь. Однако, данный метод широко применяется в холодильной технике. Существуют многократные попытки создания на его базе методик, позволяющих получить максимальную информацию об исследуемой системе [19–27].

Эксергетический и энтропийно-статистический [28] методы термодинамического анализа, основанные на втором законе термодинамики, позволяют в равной мере определить потери при работе холодильной установки.

Если рассмотреть понятие эксергии, данное Рантом в 1956 году, как работоспособности теплоты, то есть количества работы, которую можно получить при переходе от температурного уровня источника (выше температуры окружающей среды) к температуре окружающей среды,

тогда, если температура источника теплоты ниже температуры окружающей среды, что характерно для холодильных установок, то значение эксергии становится отрицательным и фактически представляет собой не ту работу, которую можно получить, а работу, которую необходимо подвести, чтобы реализовать цикл.

В этом случае, вводится понятие «эксергии холода», что вступает в противоречие с определением эксергии. Иными словами, существует два определения одной и той же величины [29].

Кроме того, энтропия является однозначной, непрерывной и конечной функцией параметров состояния. Эксергия не является параметром состояния, поскольку зависит не только от температуры рабочего вещества, но и от температуры стока теплоты, то есть эксергия вещества с одной и той же температурой может быть разной в зависимости от температуры стока.

Все это усложняет эксергетический анализ холодильных систем [30].

Эксергетический метод наиболее применим к анализу установок, целью которых является получение работы [31], [32], что не мешает использовать его, наряду с энергетическим методом анализа, в холодильной технике [33], [34], [35].

Усовершенствование энтропийного метода в МГТУ им. Н.Э. Баумана позволило определить действительные затраты на компенсацию производства энтропии вследствие необратимости рабочих процессов в различных элементах (узлах) низкотемпературных установок [36].

На основе таких процессов, как, например, трение или неравновесный теплообмен, в [37] показано, что соотношение (2) в низкотемпературных установках может быть выражено следующим образом:

$$L_{\text{действ}} = \sum l_{\min} + \left(T_{\text{oc}} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta S_i \right)_{\text{действ}}, \quad (3)$$

где $\sum l_{\min}$ – сумма минимальных работ, необходимых

для генерации холода, $\left(T_{\text{oc}} \times \sum_{i=1}^n \Delta S_i \right)_{\text{действ}}$ – ве-

личина реальных затрат энергии для компенсации производства энтропии для всех "n" элементов установки.

В настоящее время, проводятся работы как по углублению теоретических основ энтропийно-статистического метода анализа (А.М. Архаров, В.В. Сычев) [38, 39], так и по применению в конкретных отраслях промышленности, например, В.Ю. Семеновым и С.Д. Красноносковой проведен анализ установок сжижения природного газа в работах [40] и [41].

В публикации [42] приводится анализ циклов для «шоковой» заморозки продуктов питания, в [43, 44] анализируются системы для предприятий общественного питания, циклы систем кондиционирования воздуха исследованы

в [45] и [46]. Анализ установок сжижения природного газа проведен в [47, 48]. Анализ циклов с применением экологически безопасных хладагентов приведен в [49] и [50]. Низкотемпературные установки для хранения пищевых продуктов исследуются в [51]. Применение энтропийно-статистического метода анализа реальных холодильных установок обсуждалось в [52, 53].

Статистический анализ производства энтропии в теплообменном аппарате с продольно оребренными трубами с наножидкостью в межтрубном пространстве однофазным методом описан в [54].

Кроме описанных выше, существуют методы, основанные на сочетании первого и второго законов термодинамики, но не подтвержденные практически, например, [27], основанные на измерении энергопотребления [55] и [56], основанные на применении программных комплексов с закрытым алгоритмом [24] и другие [57].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из приведенных источников, количество методик анализа эффективности указанных методов

огромно, но в основе их лежат основные методы термодинамического анализа: энергетический, эксергетический и энтропийно-статистический.

При этом, применение энтропийно-статистического анализа для циклов результатом работы которых является отбор теплоты, предпочтительно.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении поисково-аналитической работы и подготовке рукописи.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This publication was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карно С., Клаузиус Р., Томсон-Кельвин У. и др. Второе начало термодинамики. М.: Либроком, 2014.
2. Ауэрбах Ф. Царица мира и ее тень. Одесса: Матезис, 1907.
3. Gouy G. Sur l'énergie utilisable // J. Phys. Theor. Appl. 1889. Vol. 8, N 1. P. 501–518. doi: 10.1051/jphysap:018890080050101
4. Stodola A. Dampf- und Gasturbinen. Mit einem Anhang über die Aussichten der Wärmekraftmaschinen – Buch gebraucht kaufen. Berlin: Springer, 1924.
5. Гохштейн Д.П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. М.: Энергия, 1969.
6. Гохштейн Д.П. Энтропийный метод расчета энергетических потерь. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1951.
7. Орлин А.С., Вырубов Д.Н., Калиш Г.Г. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Т. 1. Рабочие процессы в двигателях и их агрегатах. М.: Машгиз, 1957.
8. Архаров А.М., Шишов В.В. Теоретическое исследование работы бесклапанного детандера с газовой смазкой // Глубокий холод и кондиционирование. Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1969. С. 171–178.
9. Архаров А.М., Буткевич И.К. Анализ потерь холодопроизводительности гелиевого поршневого детандера от регенеративного теплообмена // Глубокий холод и кондиционирование. Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1969. С. 179–190.
10. Архаров А.М., Буткевич К.С., Буткевич И.К. и др. Криогенные поршневые детандеры. М.: Машиностроение, 1974.
11. Архаров А.М., Архаров И.А., Буткевич И.К. и др. Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
12. Буткевич И.К. Моделирование и исследование режимов работы криогенных гелиевых систем: дисс. ... д-ра техн. наук. М., 1994.
13. Мартыновский В.С. Анализ действительных термодинамических циклов. М.: Энергия, 1972.
14. Timmerhaus K.D., Flynn T.M. Cryogenic Process Engineering. New York: Springer Science+Business Media, 1989. doi: 10.1007/978-1-4684-8756-5
15. Колосов М.А. Теорема Гюи–Стодола применительно к холодильной технике // Холодильная техника. 2013. Т. 102, № 8. С. 40–43. doi: 10.17816/RF98606
16. Колосов М.А. Теорема Гюи–Стодола применительно к холодильной технике // Холодильная техника. 2013. Т. 102, № 9. С. 51–54. doi: 10.17816/RF98643
17. Morosuk T., Nikulshin R., Morosuk L. Entropy-cycle method for analysis of refrigeration machine and heat pump cycles // Thermal Science. 2006. Vol. 10, N 1. P. 111–124. doi: 10.2298/TSCI0601111M
18. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1988.
19. Талызин М., Горохов С. Эффективная работа систем охлаждения // Холодильная техника. 2011. Т. 100, № 9. С. 24–26. doi: 10.17816/RF98808
20. Талызин М.С., Солодкий А.С. О «плавающем» давлении конденсации // Холодильная техника. 2013. Т. 102, № 11. С. 27–29. doi: 10.17816/RF98660
21. Шишов В.В., Талызин М.С. Температурный напор в конденсаторах с воздушным охлаждением // Холодильная техника. 2014. Т. 103, № 9. С. 35–37. doi: 10.17816/RF98808
22. Шишов В.В., Талызин М.С. Повышение энергоэффективности холодильных установок при уменьшении температурного напора в конденсаторах с воздушным охлаждением // Теплоэнергетика. 2015. № 9. С. 41–44.
23. Arnemann M. Energy Efficiency of Refrigeration Systems // International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 16–19, 2012. Purdue: Purdue University, 2012. P. 1356.

24. Kullheim J. Field Measurements and Evaluation of CO₂ Refrigeration Systems for Supermarket. Master of Science Thesis. Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration, 2011.
25. Mikhailov A., Matthiesen H.O. System Efficiency for Natural Refrigerants // *ASHRAE Journal*. 2013. P. 66–78.
26. Shishov V.V., Talyzin M.S. Improving the energy efficiency of refrigeration plants by decreasing the temperature difference in air-cooled condensers // *Thermal Engineering*. 2015. Vol. 62, N 9. P. 652–655. doi: 10.1134/S0040601515090098
27. Römer S., Mosemann D., Jahn K. Universal energy efficiency evaluation method of refrigeration systems // *Proceedings of the 23rd IIR International Congress of Refrigeration: Prague, Czech Republic, August 21–26, 2011. Prague: IIF-IIR, 2011.*
28. Архаров А.М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
29. Архаров А.М. О едином термодинамическом пространстве, теплоте, холоде, эксергии и энтропии, как о базовых понятиях инженерной криологии // *Холодильная техника*. 2009. Т. 98, № 6. С. 34–39. doi: 10.17816/Rf97641
30. Архаров А.М. Почему эксергетический вариант термодинамического анализа не рационален для исследования основных низкотемпературных систем // *Холодильная техника*. 2011. Т. 100, № 10. С. 8–12. doi: 10.17816/Rf98321
31. Скулкин С.В. Оперативное диагностирование теплового энергетического оборудования ТЭС на основе эксергетического анализа. дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2012.
32. Янговский Е.И. Потоки энергии и эксергии. М.: Наука, 1988.
33. Иванова А.П. Эксергетический анализ воздушно-холодильных машин в составе авиационных систем кондиционирования воздуха. дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2013.
34. Kairouani L., Jemni N., Nehdi E. Energetic analysis of CO₂/propane and CO₂/propylene cascade refrigeration system // 6th Conference on Ammonia and CO₂ Refrigeration Technology. Proceedings: Ohrid, North Macedonia, April 16–18, 2015. Ohrid: IIF-IIR, 2015.
35. Yilmaz B., Erdönmez N., Özyurt A. et al. Energy and exergy analysis and optimization studies of a CO₂/NH₃ cascade refrigeration system // 6th Conference on Ammonia and CO₂ Refrigeration Technology. Proceedings: Ohrid, North Macedonia, April 16–18, 2015. Ohrid: IIF-IIR, 2015.
36. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы. в 2-х т. М.: Машиностроение, 1996.
37. Архаров А.М., Сычев В.В. Основы энтропийно-статистического анализа реальных энергетических потерь в низкотемпературных и высокотемпературных машинах и установках // *Холодильная техника*. 2005. Т. 94, № 12. С. 14–23.
38. Архаров А.М., Сычев В.В. И еще раз об энтропии и задаче определения реальных (действительных) величин энергетических потерь вследствие необратимости // *Холодильная техника*. 2007. Т. 96, № 4. С. 8–13.
39. Архаров А.М., Сычев В.В., Архаров И.А. Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения // *Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана, спецвыпуск*. 2008. С. 14–34.
40. Семенов В.Ю. Разработка и исследование высокоэффективных малотоннажных установок сжижения природного газа. дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2016.
41. Красноносорова С.Д. Исследование малотоннажных установок сжижения природного газа энтропийно-статистическим методом. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2016.
42. Архаров А.М., Шишов В.В., Шамсутдинов И.Р. и др. Энтропийно-статистический анализ холодильных циклов для «шоковой» заморозки // *Холодильная техника*. 2015. Т. 104, № 11. С. 38–42. doi: 10.17816/Rf98985
43. Архаров А.М., Шишов В.В., Талызин М.С. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных холодильных циклов и выбор на его основе оптимальной системы холодоснабжения магазина // *Холодильная техника*. 2016. Т. 105, № 3. С. 30–34. doi: 10.17816/Rf99047
44. Архаров А.М., Шишов В.В., Талызин М.С. Сравнение с помощью энтропийно-статистического анализа транскритических циклов на CO₂ с циклами на традиционных хладагентах для систем холодоснабжения предприятий торговли // *Холодильная техника*. 2017. Т. 106, № 2. С. 34–41. doi: 10.17816/Rf99213
45. Архаров А.М., Шишов В.В. Энтропийно-статистический анализ распределения затрат энергии на компенсацию необратимости рабочих процессов систем кондиционирования // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*. 2013. 2(91). С. 157–169.
46. Шишов В.В. Энтропийно-статистический анализ холодильных циклов для систем кондиционирования // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*. 2012. 5(5). С. 143–156. doi: 10.18698/2308-6033-2012-5-189
47. Архаров А.М., Семенов В.Ю., Красноносорова С.Д. Методика энтропийно-статистического анализа малотоннажных установок сжижения природного газа // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2015. № 10. С. 10–12.
48. Архаров А.М., Архаров И.А., Шевич Ю.А. и др. К анализу существующих установок ожижения природного газа малой производительности // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2010. № 7. С. 24–35.
49. Архаров А.М., Шишов В.В., Талызин М.С. Энтропийно – статистический анализ низкотемпературных транскритических циклов диоксида углерода // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2017. № 3(63). doi: 10.18698/2308-6033-2017-3-1601
50. Архаров А.М., Шишов В.В., Талызин М.С. Энтропийно-статистический анализ каскадных холодильных систем с CO₂ // *Холодильная техника*. 2017. Т. 106, № 10. С. 32–35. doi: 10.17816/Rf99316
51. Архаров А.М., Шишов В.В. Анализ низкотемпературных холодильных циклов с помощью энтропийно-статистического метода // *Холодильная техника*. 2014. Т. 103, № 8. С. 50–53. doi: 10.17816/Rf98806
52. Талызин М.С. Применение энтропийно-статистического метода анализа реальных холодильных систем // IX Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. С. 455–457.
53. Шишов В.В., Талызин М.С. Практическое применение энтропийно-статистического метода анализа холодильных циклов // *Холодильная техника*. 2015. Т. 104, № 3. С. 25–29. doi: 10.17816/Rf98878
54. Kumar K.P., Vinay P.V., Varaprasad B. Statistical analysis of entropy generation in longitudinally finned tube heat exchanger

with shell side nanofluid by a single-phase approach // Archives of thermodynamics. 2016. Vol. 37, N 2. P. 3–22. doi: 10.1515/aoter-2016-0010

55. Zhang M. Energy Analysis of Various Supermarket Refrigeration Systems. // International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 17–20, 2006. Purdue: Purdue University, 2006. P. 856.

REFERENCES

1. Carnot S., Clausius R., Thomson-Kelvin W. et al. *The second law of thermodynamics*. Moscow: Librokom; 2014. (in Russ).
2. Auerbach F. *The queen of the world and her shadow*. Odessa: Matezis; 1907. (in Russ).
3. Gouy G. Sur l'énergie utilisable. *J. Phys. Theor. Appl.* 1889;8(1):501–518. doi: 10.1051/jphysap:018890080050101
4. Stodola A. *Dampf- und Gasturbinen. Mit einem Anhang über die Aussichten der Wärmekraftmaschinen – Buch gebraucht kaufen*. Berlin: Springer; 1924.
5. Gokhshtein DP. *Modern methods of thermodynamic analysis of power plants*. Moscow: Energiya; 1969. (in Russ).
6. Gokhshtein DP. *Entropy method for calculating energy losses*. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat; 1951. (in Russ).
7. Orlin AS, Vyruhov DN, Kalish GG. et al. *Internal combustion engines. Vol. 1. Working processes in engines and their units*. Moscow: Mashgiz; 1957. (in Russ).
8. Arkharov AM, Shishov VV. Theoretical study of the operation of a valveless expander with gas lubrication. In: *Glubokiy kholod i konditsionirovanie. Trudy MVTU im NE Bauman*. Moscow: MVTU im NE Bauman; 1969:171–178. (in Russ).
9. Arkharov AM, Butkevich IK. Analysis of the loss of cooling capacity of a helium piston expander from regenerative heat transfer. *Glubokiy kholod i konditsionirovanie. Trudy MVTU im NE Bauman*. Moscow: MVTU im NE Bauman; 1969:179–190. (in Russ).
10. Arkharov AM, Butkevich KS, Butkevich IK, et al. *Cryogenic piston expanders*. Moscow: Mashinostroenie; 1974. (in Russ).
11. Arkharov AM, Arkharov IA, Butkevich IK, et al. *Machines of low-temperature technology. Cryogenic machines and tools*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman; 2011. (in Russ).
12. Butkevich IK. Modelirovanie i issledovanie rezhimov raboty kriogennykh geliyevykh system. [dissertation] Moscow; 1994. (in Russ).
13. Martynovsky VS. *Analysis of actual thermodynamic cycles*. Moscow: Energiya; 1972. (in Russ).
14. Timmerhaus KD, Flynn TM. *Cryogenic Process Engineering*. New York: Springer Science+Business Media; 1989. doi: 10.1007/978-1-4684-8756-5
15. Kolosov MA. The Guy–Stodola theorem as applied to refrigeration engineering. *Refrigeration technology*. 2013;102(8):40–43. (in Russ). doi: 10.17816/RF98606
16. Kolosov MA. The Guy–Stodola theorem as applied to refrigeration engineering. *Refrigeration technology*. 2013;102(9):51–54. (in Russ). doi: 10.17816/RF98643
17. Morosuk T, Nikulshin R, Morosuk L. Entropy-cycle method for analysis of refrigeration machine and heat pump cycles. *Thermal Science*. 2006;10(1):111–124. doi: 10.2298/TSCI0601111M
18. Brodyansky VM, Fratsher V, Michalek K. *Exergy method and its applications*. Moscow: Energoatomizdat; 1988. (in Russ).
19. Talyzin M, Gorokhov S. Efficient operation of cooling systems. *Refrigeration technology*. 2011;100(9):24–26. (in Russ). doi: 10.17816/RF98808
20. Talyzin MS, Solodkiy AS. On “floating” condensation pressure. *Refrigeration technology*. 2013;102(11):27–29. (in Russ). doi: 10.17816/RF98660
21. Shishov VV, Talyzin MS. Temperature difference in air-cooled condensers. *Refrigeration technology*. 2014;103(9):35–37. (in Russ). doi: 10.17816/RF98808
22. Shishov VV, Talyzin MS. Improving the energy efficiency of refrigeration units while reducing the temperature difference in air-cooled condensers. *Teploenergetika*. 2015;9:41–44. (in Russ).
23. Arnemann M. Energy Efficiency of Refrigeration Systems. In: *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 16–19, 2012*. Purdue: Purdue University; 2012. P. 1356.
24. Kullheim J. *Field Measurements and Evaluation of CO2 Refrigeration Systems for Supermarket*. [Master of Science Thesis] Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration; 2011.
25. Mikhailov A, Matthiesen HO. System Efficiency for Natural Refrigerants. *ASHRAE Journal*. 2013:66–78.
26. Shishov VV, Talyzin MS. Improving the energy efficiency of refrigeration plants by decreasing the temperature difference in air-cooled condensers. *Thermal Engineering*. 2015;62(9):652–655. doi: 10.1134/S0040601515090098
27. Römer S, Mosemann D, Jahn K. Universal energy efficiency evaluation method of refrigeration systems. In: *Proceedings of the 23rd IIR International Congress of Refrigeration: Prague, Czech Republic, August 21–26, 2011*. Prague: IIF-IIR; 2011.
28. Arkharov AM. *Fundamentals of cryology. Entropy-Statistical Analysis of Low-Temperature Systems*. Moscow: Izd-vo MGTU im NE Bauman; 2014. (in Russ).
29. Arkharov AM. On a unified thermodynamic space, heat, cold, exergy and entropy as the basic concepts of engineering cryology. *Refrigeration technology*. 2009. T. 98, № 6. C. 34–39. (in Russ). doi: 10.17816/RF97641
30. Arkharov AM. Why the exergy variant of thermodynamic analysis is not rational for studying the main low-temperature systems. *Refrigeration technology*. 2011;100(10):8–12. (in Russ). doi: 10.17816/RF98321
31. Skulkin SV. Operativnoe diagnostirovanie teplovogo energeticheskogo oborudovaniya TES na osnove eksergeticheskogo analiza. [dissertation] Saint-Petersburg; 2012. (in Russ).
32. Yantovsky EI. *Energy and exergy flows*. Moscow: Nauka; 1988. (in Russ).
33. Ivanova AP. Eksergeticheskii analiz vozdušno-kholodilnykh mashin v sostave aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukh. [dissertation] Novosibirsk; 2013. (in Russ).

34. Kairouani L, Jemni N, Nehdi E. Energetic analysis of CO₂/propane and CO₂/propylene cascade refrigeration system. In: *6th Conference on Ammonia and CO₂ Refrigeration Technology. Proceedings: Ohrid, North Macedonia, April 16–18, 2015*. Ohrid: IIF-IIR; 2015.
35. Yilmaz B, Erdönmez N, Özyurt A, et al. Energy and exergy analysis and optimization studies of a CO₂/NH₃ cascade refrigeration system. In: *6th Conference on Ammonia and CO₂ Refrigeration Technology. Proceedings: Ohrid, North Macedonia, April 16–18, 2015*. Ohrid: IIF-IIR; 2015.
36. Arkharov AM, Marfenina IV, Mikulin EI. *Cryogenic systems*. 2 vols. Moscow: Mashinostroenie; 1996. (in Russ).
37. Arkharov AM, Sychev VV. Fundamentals of entropy-statistical analysis of real energy losses in low-temperature and high-temperature machines and installations. *Refrigeration technology*. 2005;94(12):14–23. (in Russ).
38. Arkharov AM, Sychev VV. And once again about entropy and the problem of determining the real (real) values of energy losses due to irreversibility. *Refrigeration technology*. 2007;96(4):8–13. (in Russ).
39. Arkharov AM, Sychev VV, Arkharov IA. Refrigeration and cryogenic equipment, air conditioning and life support systems. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman, spetsvypusk*. 2008:14–34. (in Russ).
40. Semenov VYu. Razrabotka i issledovanie vysokoeffektivnykh malotonnazhnykh ustanovok szhizheniya prirodnogo gaza. [dissertation] Moscow; 2016. (in Russ).
41. Krasnonosova SD. Issledovanie malotonnazhnykh ustanovok szhizheniya prirodnogo gaza entropiyno-statisticheskim metodom. [dissertation] Moscow; 2016. (in Russ).
42. Arkharov AM, Shishov VV, Shamsutdinov IR, et al. Entropy-statistical analysis of refrigeration cycles for “shock” freezing. *Refrigeration technology*. 2015;104(11):38–42. (in Russ). doi: 10.17816/RF98985
43. Arkharov AM, Shishov VV, Talyzin MS. Entropy-statistical analysis of low-temperature refrigeration cycles and selection of the optimal store refrigeration system based on it. *Refrigeration technology*. 2016;105(3):30–34. (in Russ). doi: 10.17816/RF99047
44. Arkharov AM, Shishov VV, Talyzin MS. Comparison using entropy-statistical analysis of transcritical cycles on CO₂ with cycles on traditional refrigerants for commercial refrigeration systems. *Refrigeration technology*. 2017;106(2):34–41. (in Russ). doi: 10.17816/RF99213
45. Arkharov AM, Shishov VV. Entropy-statistical analysis of the distribution of energy costs to compensate for the irreversibility of the working processes of air conditioning systems. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya «Mashinostroenie»*. 2013;2(91):157–169. (in Russ).
46. Shishov VV. Entropy-statistical analysis of refrigeration cycles for air conditioning systems. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya «Mashinostroenie»*. 2012;5(5):143–156. (in Russ). doi: 10.18698/2308-6033-2012-5-189
47. Arkharov AM, Semenov VYu, Krasnonosova SD. Technique of entropy-statistical analysis of small-tonnage natural gas liquefaction plants. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2015;10:10–12. (in Russ).
48. Arkharov AM, Arkharov IA, Shevich YuA, et al. On the analysis of existing installations for the liquefaction of natural gas of low productivity. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2010;7:24–35. (in Russ).
49. Arkharov AM, Shishov VV, Talyzin MS. Entropy-statistical analysis of low-temperature transcritical cycles of carbon dioxide. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2017;3(63). (in Russ). doi: 10.18698/2308-6033-2017-3-1601
50. Arkharov AM, Shishov VV, Talyzin MS. Entropy-statistical analysis of cascade refrigeration systems with CO₂. *Refrigeration technology*. 2017;106(10):32–35. (in Russ). doi: 10.17816/RF99316
51. Arkharov AM, Shishov VV. Analysis of low-temperature refrigeration cycles using the entropy-statistical method. *Refrigeration technology*. 2014;103(8):50–53. (in Russ). doi: 10.17816/RF98806
52. Talyzin MS. Application of the entropy-statistical method for the analysis of real refrigeration systems. In: *IX All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists “The Future of Mechanical Engineering in Russia”: a collection of reports*. Moscow: Izd-vo MGTU im NE Bauman; 2016:455–457. (in Russ).
53. Shishov VV, Talyzin MS. Practical application of the entropy-statistical method for the analysis of refrigeration cycles. *Refrigeration technology*. 2015;104(3):25–29. (in Russ). doi: 10.17816/RF98878
54. Kumar KP, Vinay PV, Varaprasad B. Statistical analysis of entropy generation in longitudinally finned tube heat exchanger with shell side nanofluid by a single-phase approach. *Archives of thermodynamics*. 2016;37(2):3–22. doi: 10.1515/aoter-2016-0010
55. Zhang M. Energy Analysis of Various Supermarket Refrigeration Systems. In: *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 17–20, 2006*. Purdue: Purdue University; 2006:856.
56. Bugera Y. Emerson Climate Technologies: Energy Efficient Refrigeration Solutions for the Modern Grocery Store. *Imperiya kholoda*. 2011;10:13–14. (in Russ).
57. Sokolik AN. Improving the energy efficiency of air conditioning installations using regenerative indirect evaporative cooling. [dissertation] Moscow; 2016. (in Russ).

ОБ АВТОРЕ

Талызин Максим Сергеевич,

к.т.н.;

адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,

ул. 2-я Бауманская, д. 5;

ORCID: 0000-0001-7244-1946;

eLibrary SPIN: 6524-3085;

e-mail: talyzin_maxim@mail.ru

AUTHOR'S INFO

Maxim S. Talyzin,

Cand. Sci. (Tech.);

address: 5 2nd Bauman'skaya street, Moscow 105005,

Russian Federation;

ORCID: 0000-0001-7244-1946;

eLibrary SPIN: 6524-3085;

e-mail: talyzin_maxim@mail.ru