

УДК 621.575

## Оценка степени термодинамического совершенства на основе анализа работы действующей абсорбционной холодильной установки системы синтеза аммиака

Д-р техн. наук Л. В. ГАЛИМОВА  
galimova\_lv@mail.ru

Астраханский государственный технический университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16

В. Я. КАЙЛЬ

nevinazot@eurochem.ru

ОАО «Невинномысский Азот»

357107, г. Невинномысск, ул. Низяева, 1

А. И. ВЕДЕНЕЕВА

665sosedzver@mail.ru

Астраханский государственный технический университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16

Представлены результаты анализа и оценка эффективности абсорбционной водоаммиачной холодильной машины (АХУ), входящей в состав промышленной системы синтеза аммиака ОАО «Азот», г. Невинномысск, работающей на использовании тепла конвертированного газа, идущего из конвертора оксида углерода. В основу анализа работы АХУ положены результаты наблюдений в процессе эксплуатации 2009–2010 гг. и производственного эксперимента, проведенного в 2014 и 2015 гг. Для оценки термодинамической эффективности системы был принят метод эксергетического анализа. Анализ работы АХУ проведен с определением следующих технических характеристик, отражающих условия эксплуатации машины по месяцам года; изменение выработки товарного продукта, температуры кипения, интервала дегазации, расхода холодильного агента, полных тепловых нагрузок аппаратов, теплового коэффициента, сравнение действительных и расчетных значений концентраций крепкого и слабого растворов. Установлено, что в работе АХУ наблюдались нарушения режима, приведено объяснение возникших отклонений. Характер отклонений и их влияние на эффективность работы машины отражены в результатах эксергетического анализа.

**Ключевые слова:** энергосбережение, абсорбционная водоаммиачная холодильная машина, синтез аммиака, производственный эксперимент, технические характеристики, эксергетический анализ.

## Energy saving system absorption refrigerating machine of ammonia synthesis installation: performance analysis and thermodynamic perfection evaluation

D. Sc. L. V. GALIMOVA

galimova\_lv@mail.ru

Astrakhan State Technical University, Russia

V. Ya. KAYL

nevinazot@eurochem.ru

JSC «Nevinnomysskiy Azot», Russia

A. I. VEDENEYEVA

665sosedzver@mail.ru

Astrakhan State Technical University, Russia

Water-ammonia absorption refrigerating machine (ARM) efficiency evaluation is made. The machine is a part of ammonia synthesis installation of Azot Open Joint-Stock Company (Nevinnomyssk, Russia) running on converted gas heat form nitrogen monoxide converter. The analysis is based on the ARM operation data of the year 2009–2010 and experimental results of the year 2014–2015. Exergy analysis is used to estimate thermodynamic system effectiveness. The analysis of ARM performance is carried out taking into account the following characteristics of the machine operation conditions in different months of the year: final product output change, boiling temperature, decontamination interval, refrigerant consumption, full thermal load of the units, thermal factor and comparison of actual and design values of strong and weak solution concentration. ARM operation disturbances are shown to take place, the explanation of deviations being given. Character of deviations and their influence on the performance of the machine are reflected in exergy analysis results.

**Keywords:** energy saving, water-ammonia absorption refrigerating machine, ammonia synthesis, industrial experiment, technical characteristics, exergy analysis.

На современном этапе развития промышленных предприятий энерго- и ресурсосбережение является одной из важнейших задач. Экономия топливно-энергетических ресурсов определена как главное направление научно-технического прогресса в химической технологии, так как зачастую в химических производствах расход энергии составляет основную часть затрат в себестоимости готовой продукции. Последнее проявляется наиболее актуально при увеличении объемов производства химической продукции, при создании сложных химико-технологических систем (ХТС) с агрегатами большой единичной мощности и т. п. [1]. Абсорбционные холодильные машины находят применение в производстве на тех объектах, которые располагают источниками дешевой теплоты.

Современное производство синтетического аммиака [2, 3] состоит из ряда последовательных технологических стадий, сосредоточенных в отдельных блоках: сероочистки природного газа, конверсии метана в трубчатой печи, паровоздушной каталитической конверсии метана в шахтном конверторе, двухступенчатой каталитической конверсии СО (среднетемпературной и низкотемпературной), абсорбционной очистки синтез-газа от  $\text{CO}_2$ , метанирования остаточных СО и  $\text{CO}_2$ , компрессии и синтеза аммиака. Характерной особенностью блока синтеза аммиака является применение абсорбционной водоаммиачной холодильной машины (рис. 1), работающей

на использовании тепла конвертированного газа, идущего из конвертора оксида углерода.

В основу анализа работы АХУ были положены результаты наблюдений в процессе эксплуатации 2009–2010 гг. и производственного эксперимента, проведенного в 2014 и 2015 гг. Для оценки термодинамической эффективности системы был принят метод эксергетического анализа.

Анализ работы АХУ был проведен с использованием тепловых расчетов и основных положений по эксплуатации [4–6]. На основании данных, полученных на предприятии, на рис. 2 показана зависимость выработки товарного аммиака от температуры в испарителе.

Как видно из графика, со снижением температуры в испарителе выработка товарного аммиака увеличивается. Регламентное значение температуры кипения  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ . Действительное значение температуры в испарителе по месяцам меняется в пределах  $-10,5\dots -3,3\text{ }^\circ\text{C}$ . На рис. 3 приведен график изменения температуры в испарителе в зависимости от значений давления кипения, снятых в ходе производственного эксперимента. Температура в испарителе, в основном, оказывается выше температуры кипения чистого аммиака. Это говорит о том, что в аппарате присутствует вода в виде флегмы, что является одной из причин повышения температуры кипения.

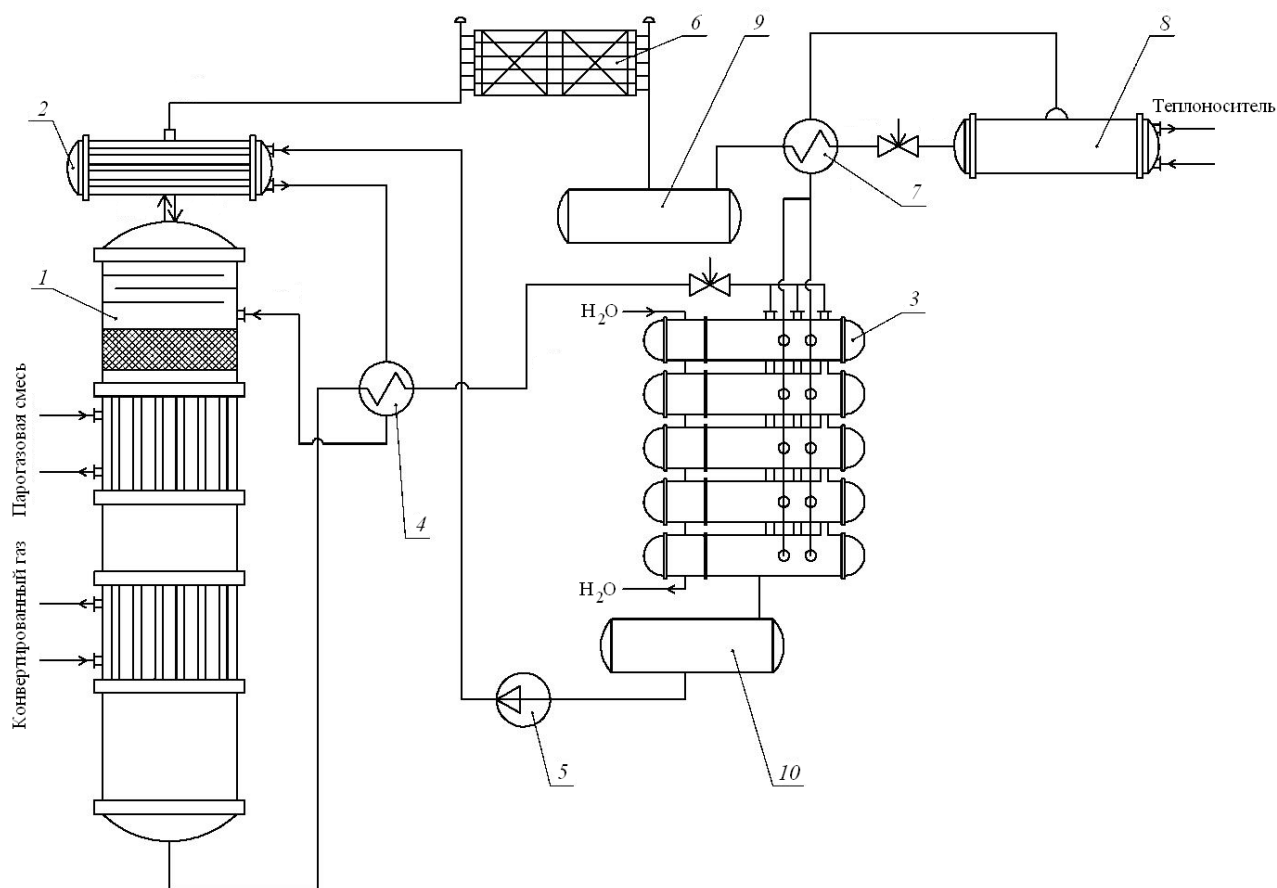


Рис. 1. Абсорбционная холодильная машина:

- 1 — генератор-ректификатор; 2 — дефлегматор; 3 — абсорбер элементный; 4 — теплообменник растворов элементный;  
5 — насос; 6 — конденсатор; 7 — газовый переохладитель жидкого аммиака; 8 — испаритель жидкого аммиака;  
9 — ресивер жидкого аммиака; 10 — ресивер

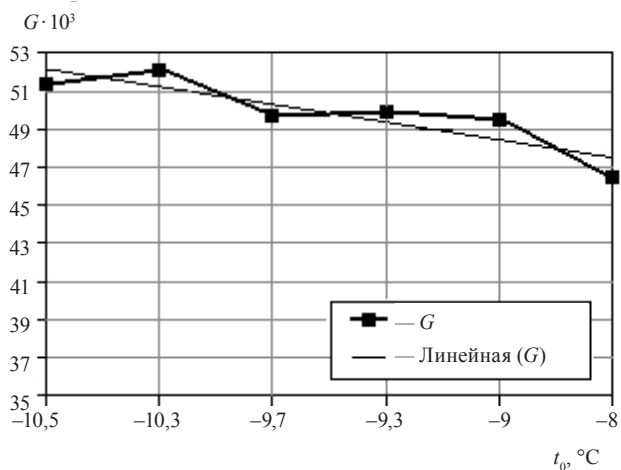


Рис. 2. Выработка товарного аммиака

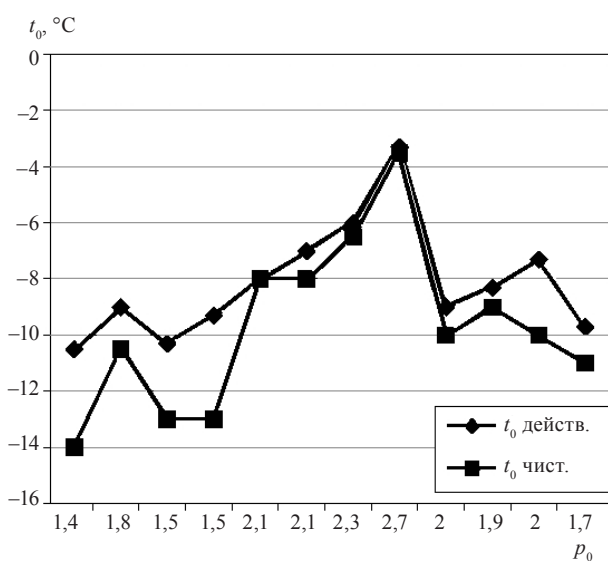


Рис. 3. Изменение температуры кипения

Одной из важнейших характеристик работы холодильной машины является величина интервала дегазации. На рис. 4 для сравнения приведены графики изменения интервала дегазации. Расчетное значение получено с использованием параметров, снятых в процессе про-

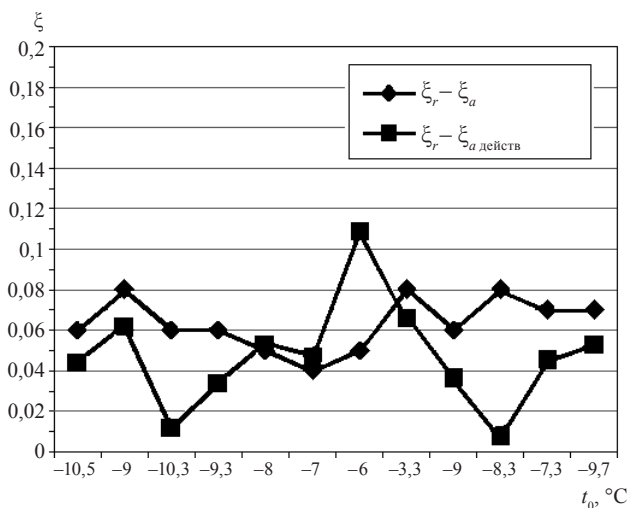


Рис. 4. Изменение интервала дегазации

изводственного эксперимента, действительные значения определены как разность концентраций крепкого и слабого раствора, полученных в лаборатории предприятия.

На графике видны резкие скачки в значениях действительного интервала дегазации при совершенно различных условиях работы. В холодное время года (март, ноябрь), когда охлаждающая вода имеет достаточно низкую температуру и должна обеспечивать высокое значение концентрации крепкого раствора, ее величина оказывается ниже, чем в мае. Причиной может быть увеличенный перегрев воды в абсорбере из-за уменьшения ее подачи, либо недостаточная эффективность градирни. В июле, в самый трудный период работы машины, наблюдается резкое увеличение интервала дегазации, что невозможно при соблюдении правильного режима работы. Предположительно объяснение может быть следующим: в связи с загрязнением распределительных колпачков в вертикальные трубы генератора поступало малое количество крепкого раствора, в процессе кипения концентрация слабого раствора снижается, что ведет к искусственному увеличению интервала дегазации, либо повлияло дренирование испарителя, в результате которого повысилась концентрация крепкого раствора в абсорбере. Если исключить из рассмотрения пиковые показатели, связанные с нарушениями режима работы машины, можно считать, что действительная величина интервала дегазации примерно соответствует расчетной. Вторым важнейшим фактором является расход холодильного агента, определяющий полные тепловые нагрузки аппаратов.

На рис. 5 представлена зависимость расхода холодильного агента от температуры в испарителе. В летнее время года наблюдается резкое снижение расхода холодильного агента, вызванное указанными ранее причинами. Расчет расхода по средним близким значениям показал, что при росте температуры в испарителе расход закономерно увеличивается.

На основании расчетов по данным производственного эксперимента получены основные характеристики холодильной машины (рис. 6). Отклонения от средних значений составляют +22... -30%.

Низкие значения характеристик, относящиеся к летнему режиму, являются не корректными, т. к. связаны

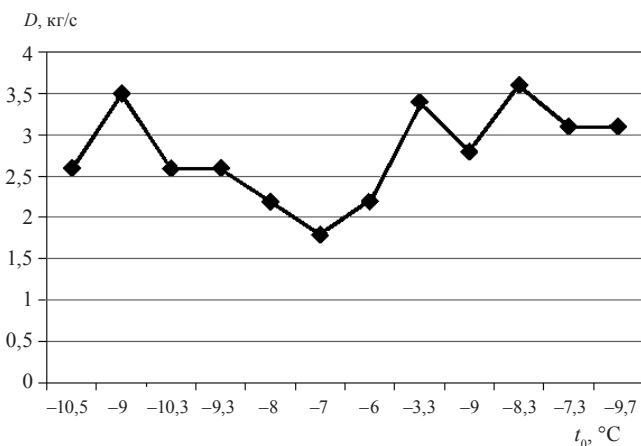


Рис. 5. Изменение расхода холодильного агента

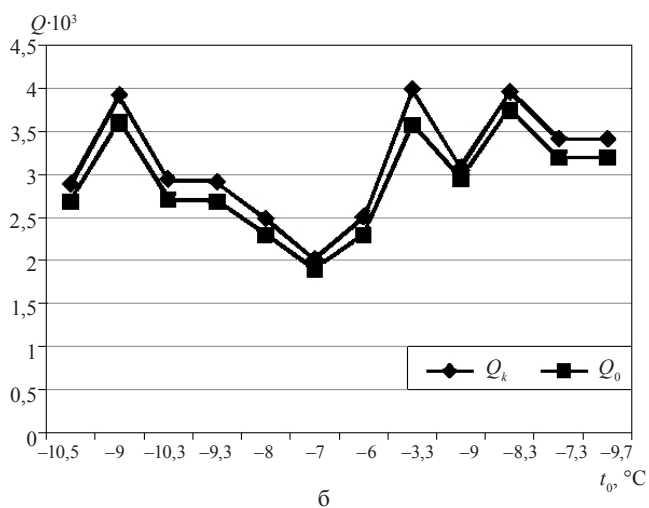
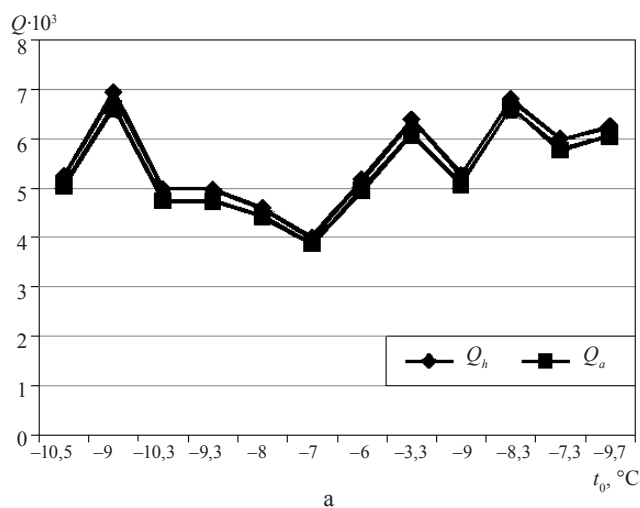


Рис. 6. Основные характеристики АХУ (полные тепловые нагрузки аппаратов): а — генератор, абсорбер; б — конденсатор, испаритель

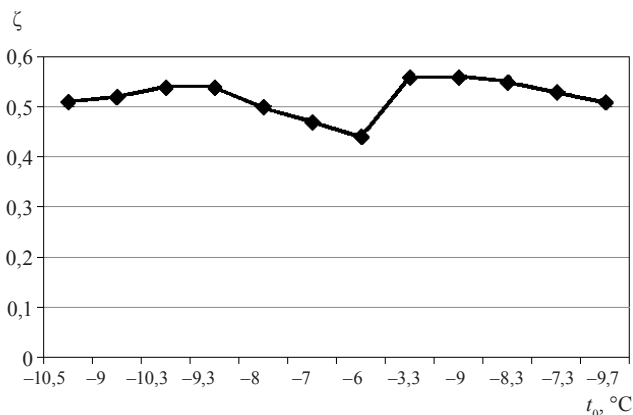


Рис. 7. Изменение теплового коэффициента

с нарушением режима. Изменение характеристик для остальных значений можно считать закономерным.

Среднее значение теплового коэффициента (рис. 7) определяется величиной 0,52, что, на первый взгляд,

является удовлетворительным. Однако, при действительных значениях интервала дегазации, близких к нулю, и необоснованно высоких значениях летом, тепловой коэффициент не может быть объективной оценкой эффективности работы машины. Для определения условий получения, близких к регламенту технических характеристик машины, был проведен анализ действительных значений концентраций крепкого и слабого растворов (рис. 8).

Сравнение графиков изменения концентраций позволило заключить, что действительный интервал дегазации сдвигается в зону более низких концентраций, в связи с чем увеличивается расход греющего источника и возникают трудности, связанные с работой генератора.

Стабилизация режима работы холодильной машины, поддержание проектной температуры в испарителе, повышение концентрации крепкого раствора [7, 8] позволят исключить нулевой интервал дегазации и повысить технические характеристики машины.

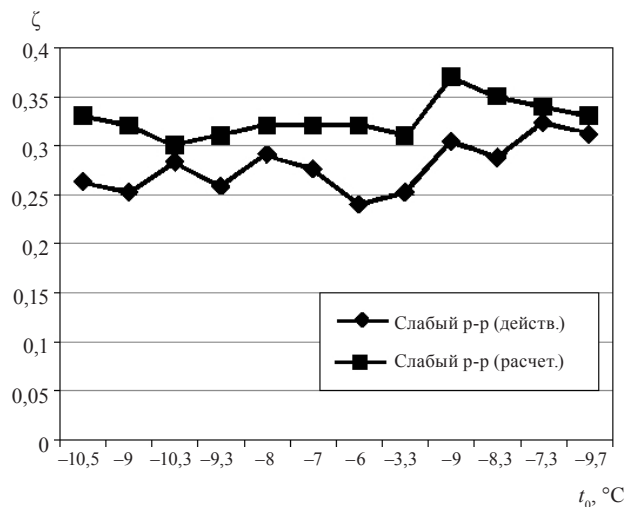
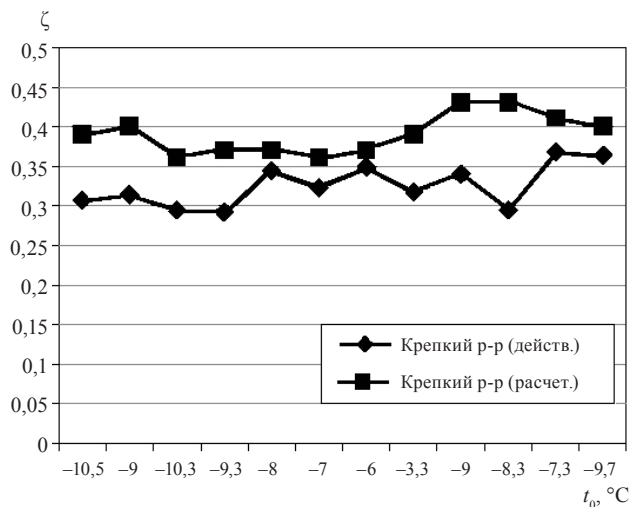


Рис. 8. Сравнение действительных и расчетных значений концентраций растворов: а — крепкого; б — слабого

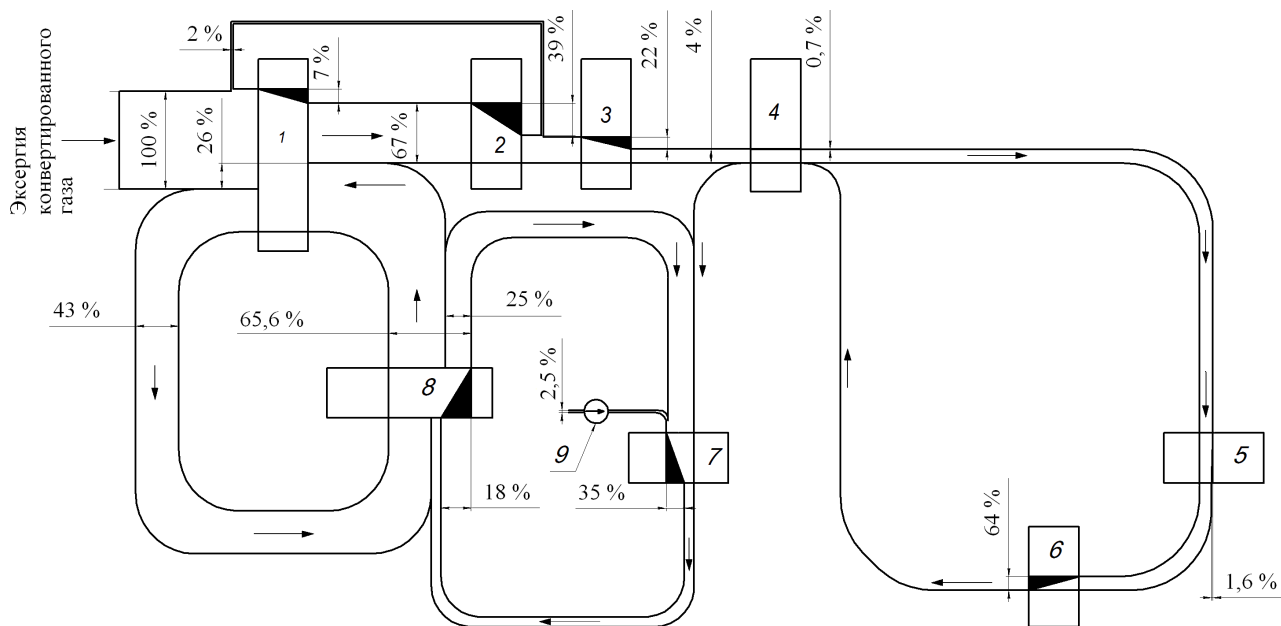


Рис. 9. Диаграмма потоков потерь эксергии:

1 — генератор, 2 — дефлегматор; 3 — конденсатор; 4 — переохладитель; 5 — отделитель жидкости; 6 — испаритель; 7 — абсорбер; 8 — теплообменник; 9 — насос

Для термодинамической оценки системы и обоснования выбранного направления ее совершенствования был проведен эксергетический анализ.

Степень термодинамического совершенства процессов определялась на основе составления эксергетического баланса и нахождения эксергетического КПД для отдельных элементов и системы в целом. Полученная при этом информация в виде распределения и характеристики потерь, вследствие необратимости процессов, может служить основой для дальнейших исследований по усовершенствованию системы. Результатом расчета является построение диаграммы эксергии потоков (диаграмма Грассмана), которая наглядно показывает величины потерь эксергии в системе и их распределение между элементами процесса [9, 10].

Расчет потоков и потерь эксергии абсорбционной холодильной машины был проведен для каждого месяца исследуемого периода. Пример диаграммы Грассмана по результатам наблюдений в июле приведен на рис. 9.

Как видно из диаграммы, меньшие значения эксергетического КПД относятся к испарителю и абсорберу. В испарителе эксергетические потери классифицируются как внутренние, определенные технологией процесса. В абсорбере эксергетические потери определяются наличием большой разности температур между раствором и охлаждающей водой. Уменьшение эксергетических потерь в абсорбере может быть достигнуто повышением концентрации и соответственным снижением температуры крепкого раствора.

Стабилизация работы абсорбера позволит обеспечить необходимую выработку товарного продукта.

С целью решения поставленной задачи были выработаны два предложения:

- Разработка схемы двухступенчатой абсорбции;
- Интенсификация работы абсорбера за счет использования поверхностно-активных веществ.

## Выводы

1. В работе АХУ наблюдались нарушения режима, которые приводят к необоснованным изменениям интервала дегазации, что соответствующим образом влияет на основные характеристики АХУ.

2. Исключение из рассмотрения пиковых характеристик АХУ позволяет сделать вывод о том, что характер изменения средних значений является закономерным.

3. Сдвиг интервала дегазации в сторону более высоких концентраций позволит улучшить основные характеристики. Обеспечение постоянства значений концентрации слабого раствора в генераторе и пара в конденсаторе сводит задачу улучшения показателей работы системы в целом к увеличению концентрации крепкого раствора в абсорбере.

4. Необходимость поддержания температуры кипения на уровне регламента требует поиска возможности совершенствования работы испарителя.

5. Оценка степени термодинамического совершенства элементов и системы в целом, проведенная на основе эксергетического анализа, подтвердила выбранные направления совершенствования системы.

## Список литературы

1. Мишин В. М. Переработка природного газа и конденсата. — М., Academia, 1999. 445 с.
2. Кузнецов Л. Д., Дмитриенко М. Л., Рабина П. Д., Соколинский Ю. А. Синтез аммиака. — М.: Химия. 1982. 296 с.
3. Бляск Е., Лайдлер К., Павликовский С. и др. Технология связанного азота. Синтетический аммиак. — М.: Госхимиздат, 1961. 623 с.
4. Бараненко А. В., Бухарин Н. Н. Холодильные машины. Под общ. ред. Тимофеевского Л. С. — СПб.: Политехника, 2006. 944 с.



5. Бадилькес И. С., Данилов Р. Л. Абсорбционные холодильные машины. — М.: Пищевая промышленность, 1966. 355 с.
6. Галимова Л. В. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы. — Астрахань: АГТУ, 1997. 166 с.
7. Галимова Л. В., Веденева А. И. Совершенствование процесса абсорбции абсорбционной холодильной машины в системе синтеза аммиака. // Холодильная техника № 12. 2013.
8. Абсорбционная водоаммиачная холодильная машина с двухступенчатой абсорбцией для ОАО «Азот», г. Невинномысск. Сб. материалов Международной научно-практической конференции. — Одесса, 2012.
9. Бродянский В. М. Эксергетический метод и перспективы его развития // Теплоэнергетика. 1988. № 2.
10. Галимова Л. В., Гуди Т. К., Веденева А. И. Эксергетический анализ технических систем. — Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 77 с.
3. Blasyak E., Laidler K., Pavlikovskii S. i dr. Technology of the connected nitrogen. Synthetic ammonia. — M.: Goskhimizdat, 1961. 623 p. (in Russian)
4. Baranenko. A. V., Bukharin N. N. Refrigerators. Under a general edition Timofeevskogo L. S. — SPb.: Politekhnik, 2006. 944 p. (in Russian)
5. Badyl'kes I. S., Danilov R. L. Absorbing refrigerators. — M.: Pishchevaya promyshlennost', 1966. 355 p. (in Russian)
6. Galimova L. V. Absorbing refrigerators and thermal pumps. — Astrakhan': AGTU, 1997. 166 p. (in Russian)
7. Galimova L. V. Vedeneeva A. I. Improvement of process of absorption of the absorbing refrigerator in system of synthesis of ammonia. *Kholodil'naya tekhnika*. No 12. 2013. (in Russian)
8. The absorbing water ammoniac refrigerator with two-level absorption for JSC Azot, Nevinnomyssk. Materials of the International scientific and practical conference. — Odessa, 2012. (in Russian)
9. Brodyanskii V. M. Eksergetichesky method and prospects of its development. *Teploenergetika*. 1988. No 2. (in Russian)
10. Galimova L. V., Guidi T. K., Vedeneeva A. I. Eksergetichesky analysis of technical systems. — Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 77 p. (in Russian)

### References

1. Mishin V. M. Processing of natural gas and condensate. — M., Academa, 1999. 445 p. (in Russian)
2. Kuznetsov L. D., Dmitrienko M. L., Rabina P. D., Sokolinskii Yu. A. Ammonia synthesis. — M.: Khimiya. 1982. 296 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 03.06.2015

Министерство образования и науки Российской Федерации  
 Научный Совет РАН по проблеме «Теплофизика и теплоэнергетика»  
 Университет ИТМО  
 Международная академия холода  
 Международная академия наук высшей школы  
 Рабочая группа ИС РАН «Свойства хладагентов и теплоносителей»

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ ЭНЕРГО- И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫЕ РАБОЧИЕ ВЕЩЕСТВА В ТЕХНОЛОГИЯХ ГЕНЕРАЦИИ ХОЛОДА И ТЕПЛОТЫ 3 февраля 2016 г.

### ТЕМЫ, ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Как отзовется экологический Саммит в декабре 2015 г. (Париж);
- К 85-летию Alma mater холодильщиков России и СНГ – ЛТИХП, СПбГАХиПТ, СПбГУНиПТ, Университет ИТМО;
- Энергетические и экологические приоритеты современной техники низких температур;
- Новые синтетические хладагенты – альтернативы ГХФУ и ГФУ;
- Реалии и перспективы перехода на диоксид углерода, аммиак и углеводороды в технике низких температур;
- Энергоэффективные решения циклов холодильных машин и тепловых насосов;
- Теплофизические свойства рабочих веществ, процессы тепло- и массообмена в аппаратах установок техники низких температур и низкопотенциальной энергетики;
- Хладоносители, аккумуляция теплоты и холода; тепловые насосы как возобновляемый источник энергии;
- Абсорбционные холодильные машины и другие сорбционные системы;
- Энерго-экономические и климатические факторы, их влияние на состояние и перспективы развития индустрии тепловых насосов для жилья и торговых помещений;
- Органические циклы для производства электроэнергии; системы ко- и тригенерации для тепло- и хладоснабжения;
- Безопасные и энергоэффективные системы с малой заправкой рабочего вещества;
- Изменение климата и проблемы инженерного мерзлотоведения;
- Проблемы замораживания и термостабилизации грунтов в строительстве при освоении вечной мерзлоты;
- Тепловая изоляция, комфорт и здоровье человека, «зеленые дома»;
- Смазочные масла низкотемпературных установок; термоэлектрические материалы и системы охлаждения;
- Сжиженные природные газы, водородная энергетика; промышленные тепловые насосы.

Заявки на участие в конференции подавать до 20.01.2016 г. (с пометкой "Хладагенты")  
 на электронный адрес: [max\\_iar@gunipt.spb.ru](mailto:max_iar@gunipt.spb.ru); [laptev\\_yua@mail.ru](mailto:laptev_yua@mail.ru)

Тел./Факс: (812) 571-69-12, 571-56-89  
 Адрес проведения: Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, Университет ИТМО  
 Подробная информация на сайте:  
[www.maxiar.spb.ru](http://www.maxiar.spb.ru)