

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.А. Дзино, О.С. Малинина

АБСОРБЦИОННЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2016

УДК 621.575

Дзино А.А., Малинина О.С. Абсорбционные холодильные машины: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 39 с.

Приводятся теоретический материал и методические указания к самостоятельной работе бакалавров направления 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения по дисциплине «Теплоиспользующие холодильные машины» очной формы обучения.

Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.А. Пронин

Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 2 от 27.10.2016 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Дзино А.А., Малинина О.С., 2016

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Теплоиспользующие холодильные машины» является одной из завершающих дисциплин в подготовке бакалавра-холодильщика. Эта дисциплина базируется на ранее изученных студентами дисциплинах, таких как «Введение в специальность», «Теоретические основы холодильной техники и низкотемпературные машины», «Расчет и конструирование объемных компрессоров» и т. д.

В случае трудности усвоения материала из-за недостатка знаний по ранее изученным дисциплинам студент должен обратиться к соответствующим дисциплинам самостоятельно.

Изучать теоретическую часть дисциплины рекомендуется последовательно по темам, придерживаясь следующего порядка:

а) ознакомиться с содержанием темы по программе и методическим указаниям к ней;

б) пользуясь списком рекомендованной литературы, проработать материал, относящийся к данной теме. Особое внимание надо обращать на усвоение принципиальных положений и глубокое понимание изучаемого материала;

в) изучение темы закончить ответами на вопросы для самопроверки. При этом не рекомендуется обращаться к помощи конспекта или учебника;

г) перейти к изучению следующей темы только после усвоения предыдущего материала.

Контрольные работы являются итогом изучения всей дисциплины.

Неясные вопросы могут решаться путем письменных и устных консультаций.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

1. АБСОРБЦИОННЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

1.1. Классификация абсорбционных холодильных машин

Из-за возросших требований, связанных с созданием безотходной технологии различных производств и экономией топливно-энергетических ресурсов, абсорбционные холодильные машины (АХМ) стали широко применять в промышленности на тех объектах, которые располагают источниками дешевой теплоты. АХМ по температурному уровню охлаждаемого источника разделяют на две подгруппы: АХМ для области положительных и АХМ для области отрицательных температур охлаждения; некоторые типы АХМ могут применяться как в области отрицательных, так и в области положительных температур охлаждения. В зависимости от используемых в настоящее время в промышленных АХМ рабочих веществ их можно разделить на две основные группы – водоаммиачные и бромистолитиевые. По типу циклов АХМ можно разделить на АХМ с одно- и многоступенчатыми циклами. АХМ с одноступенчатыми циклами в основном используют для выработки холода в области положительных и отрицательных температур охлаждения (до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для получения холода с температурой ниже $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ применяют, как правило, двухступенчатые АХМ; могут применяться и трехступенчатые АХМ, а также машины с двумя и более температурными уровнями охлаждения. Одноступенчатые и многоступенчатые циклы АХМ разделяют, в свою очередь, на циклы с простыми и сложными процессами тепломассопереноса в основных аппаратах. Простыми процессами являются одноступенчатые с совмещенным и раздельным тепломассопереносом в аппаратах; к сложным процессам относятся процессы со ступенчатой абсорбцией, десорбцией, конденсацией, кипением, материальной регенерацией рабочих веществ и др. При существенном изменении диапазона температур внешних источников теплоты могут применяться абсорбционно-резорбционные АХМ, характеризующиеся в данных условиях высокой энергетической эффективностью. В зависимости от вида используемых внешних источников теплоты АХМ раз-

деляются на АХМ с паровым, газовым, жидкостным или солнечным обогревом генераторов, АХМ с водяным или воздушным охлаждением абсорберов и конденсаторов (или с комбинацией указанных источников охлаждения аппаратов).

По степени агрегатирования АХМ разделяются на агрегатированные (с конструктивным объединением всех элементов в один или несколько блоков) и неагрегатированные (с отдельно выполненными элементами АХМ). К агрегатированным относятся бромистолитиевые АХМ.

В зависимости от схем включения АХМ в технологические процессы различных производств их можно разделить на автономные, не зависящие от схемы технологического процесса, и встроенные – с объединением части цикла АХМ с технологическим процессом.

Широко применяют также безнасосные АХМ как непрерывного, так и периодического принципов действия.

На выбор типа АХМ и ее схемы основное влияние оказывают требования объекта, особенности технологического процесса, обслуживаемого АХМ, температурный уровень и виды греющего, охлаждаемого источников и источника окружающей среды, стоимостные показатели теплоты, охлаждающей воды, рабочих веществ, конструкционных материалов АХМ и другие факторы. На выбор АХМ существенное влияние оказывает также вид выпускаемой продукции на предприятии. Например, на аммиачных, углеводородных, хладоновых и подобных им производствах предпочтительно применять встроенные АХМ с использованием теплоты ВЭР указанных производств. При этом в АХМ могут использоваться рабочие вещества, являющиеся продукцией соответствующих производств.

Следует иметь в виду то обстоятельство, что наличие дешевой теплоты ВЭР технологических процессов с необходимым температурным уровнем для обогрева генераторов АХМ практически всегда предопределяет экономическую целесообразность их применения для выработки холода. Однако в каждом случае выбор типа АХМ должен устанавливаться на основе технико-экономических расчетов или комплексной оптимизации для конкретных условий эксплуатации АХМ на объекте.

1.2. Рабочие вещества абсорбционных холодильных машин

Процессы абсорбционных холодильных машин осуществляются с помощью рабочих веществ – растворов, состоящих, как правило, из двух компонентов – хладагента и абсорбента. При работе машины хладагент периодически находится как в жидком, так и в парообразном состояниях, а абсорбент – только в жидком состоянии.

В последние годы для повышения эффективности АХМ проведен цикл исследований процессов получения холода с использованием таких растворов, как холинхлорид–вода, монометиламин–глицерин, метанол–бромистый литий, хлористый литий–нитрат лития–вода и др.

Целесообразно проверять эффективность того или иного раствора, поскольку в ряде случаев требуется исключить ректификацию пара рабочего вещества в генераторе (по сравнению с водоаммиачным раствором), увеличить растворимость бинарной системы хлористый литий–вода, снизить коррозионную активность водного раствора бромистого лития по отношению к конструкционным материалам АХМ или достичь других показателей. В целом энергетическая эффективность исследованных альтернативных растворов оказалась примерно одинаковой с соответствующими известными растворами, однако по ряду других показателей и при определенных условиях они могут быть рекомендованы к использованию в АХМ.

1.3. Энергетическая эффективность абсорбционных холодильных машин

Системе, состоящей из конденсационной электростанции (КЭС) и компрессионной холодильной машины (КХМ), альтернативой являются теплоиспользующие холодильные машины, в которых для привода применяется высокотемпературная теплота. В основном это парожекторные и абсорбционные машины [1].

Энергетическая эффективность компрессионной холодильной машины оценивается холодильным коэффициентом:

$$\varepsilon = \frac{Q_0^{\text{об}}}{L_0}.$$

Энергетическая эффективность теплового двигателя оценивается термическим КПД прямого цикла:

$$\eta = \frac{L}{Q_{\text{в}}^{\text{пр}}}.$$

Энергетическая эффективность системы КЭС + КХМ оценивается тепловым коэффициентом:

$$\zeta = \frac{Q_0^{\text{об}}}{Q_{\text{в}}^{\text{пр}}} = \frac{\varepsilon L_0 \eta}{L} = \varepsilon \eta.$$

Холодильный коэффициент изменяется в интервале от 0 до $+\infty$, термический КПД – в интервале от 0 до 1. Отсюда и тепловой коэффициент изменяется от 0 до $+\infty$. На величину теплового коэффициента влияет в основном значение термического КПД.

1.4. Абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины

В настоящее время в промышленности применяют абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ) с одно- и двухступенчатой генерацией пара рабочего вещества, а также АБХМ с совмещенным или отдельным тепломассопереносом в абсорбере. В свою очередь, АБХМ с двухступенчатой генерацией пара рабочего вещества могут работать по схемам с прямоточным и параллельным направлениями движения раствора и пара через ступени генераторов низкого и высокого давлений. Их целесообразно применять при температуре греющего источника, превышающей на (50–60) °С температуру, необходимую для осуществления одноступенчатых циклов АБХМ.

Выбирать ту или иную схему, а следовательно, и цикл АБХМ на первоначальном этапе разработки машины или системы охлаждения следует на основе анализа их термодинамической эффективности с учетом конкретных параметров внешних источников теплоты.

1.5. Схема, теоретический цикл, принцип действия и основные процессы абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины

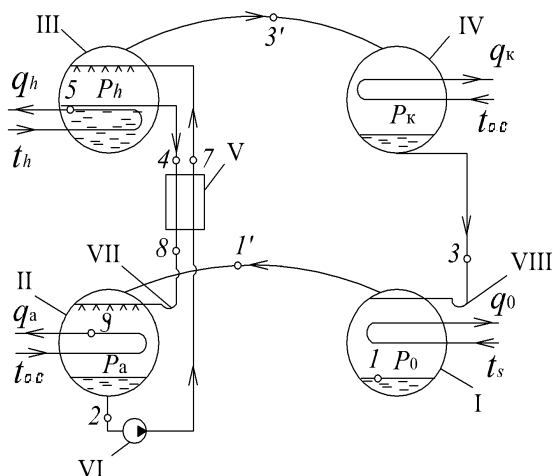
Схема и теоретический цикл абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) с одноступенчатой генерацией пара рабочего вещества и совмещенным тепломассопереносом в аппаратах представлены на рис. 1.1. В качестве теоретического цикла АБХМ принят цикл при следующих условиях (см. рис. 1.1, б): отсутствуют потери от неполноты насыщения и неполноты выпаривания раствора при абсорбции пара и кипении раствора в соответствующих аппаратах; в теплообменнике растворов имеет место полная рекуперация теплоты, т. е. на холодной стороне теплообменника растворов имеет место равенство $t_2 = t_8$; гидравлические сопротивления, возникающие при прохождении пара из испарителя в абсорбер и из генератора в конденсатор, отсутствуют; высшая температура раствора в конце его кипения в генераторе t_4 равна температуре греющего источника t_h ; низшая температура при абсорбции t_2 равна температуре конденсации пара t_k , которая, в свою очередь, принята равной температуре охлаждающей среды $t_{o.c.}$; температура кипения воды в испарителе t_0 равна температуре охлаждаемого источника t_s ; состояние пара, поступающего из генератора АБХМ в конденсатор, определяется по максимально допустимой концентрации крепкого раствора ξ_r и давлении раствора при его кипении p_h .

В испарителе I (см. рис. 1.1, а) за счет подвода теплоты от охлаждаемого источника в количестве q_0 кипит вода при давлении $p_0 = p_a$. При этом источник охлаждается до температуры t_s . Водяной пар, образовавшийся в испарителе, поступает в абсорбер II, где он абсорбируется крепким раствором, стекающим из генератора III через растворный теплообменник V и гидравлический затвор VII в абсорбер. Вследствие абсорбции пара раствором концентрация последнего снижается.

Теплота, выделяющаяся в процессе абсорбции, отводится к источнику окружающей среды в количестве q_a при температуре $t_{o.c.}$. Слабый раствор из абсорбера насосом VI подается через растворный теплообменник в генератор, где он кипит при давлении p_h вследствие подвода теплоты от греющего источника в количестве q_h при температуре t_h . Водяной пар, образовавшийся в генераторе, поступает в

конденсатор, где конденсируется при давлении $p_k = p_h$. Теплота перегрева конденсации пара отводится к источнику окружающей среды в количестве q_k при температуре $t_{o.c}$. Конденсат из конденсатора стекает в испаритель через гидравлический затвор VIII.

а



б

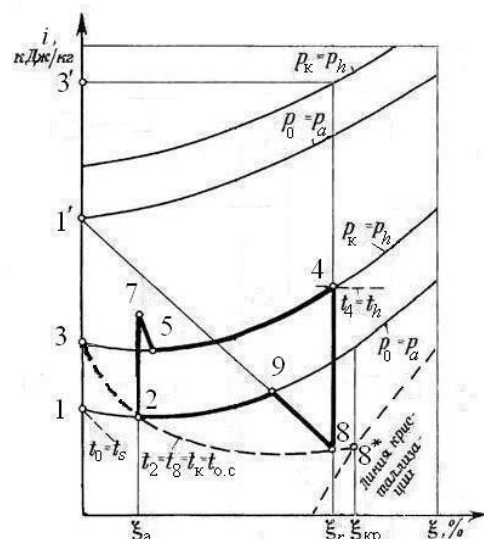


Рис. 1.1. Абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина с одноступенчатой генерацией пара рабочего вещества и совмещенным тепломассопереносом в генераторе и абсорбере:

а – схема машины; б – процессы на ξ - i -диаграмме;

p_0, p_h, p_a, p_k – давление кипения рабочего вещества, раствора, абсорбции и конденсации пара соответственно;

ξ_a, ξ_r, ξ_{cp} – концентрация слабого, крепкого растворов и средняя в цикле соответственно

Основные процессы цикла (см. рис. 1.1, б) следующие: 2–7 – нагрев слабого раствора в теплообменнике растворов; 7–5 – адиабатно-изобарная десорбция пара рабочего вещества; 5–4 – кипение раствора в генераторе при совмещенном тепломассопереносе; 4–8 – охлаждение крепкого раствора в теплообменнике растворов; 8–9 – адиабатно-изобарная абсорбция пара рабочего вещества; 9–2 – абсорбция пара рабочего вещества при совмещенном тепломассопереносе в абсорбере; 3'–3 – отвод теплоты перегрева и конденсация пара рабочего вещества в конденсаторе; 1–1' – кипение рабочего вещества в испарителе.

Основные соотношения для расчета теоретического цикла АБХМ с одноступенчатой генерацией пара рабочего вещества и совмещенным тепломассопереносом в аппаратах определяются расчетным путем, либо с помощью ЭВМ, либо вручную после построения цикла на ξ - i -диаграмме (см. рис. 1.1, б), для водного раствора бромистого лития по заданным температурам внешних источников теплоты и после определения основных параметров цикла АБХМ.

1.6. Методика расчета теоретического цикла абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины

Исходные данные

Температура охлаждающей среды $t_{o.c}, ^\circ\text{C}$

Температура охлаждаемой среды $t_s, ^\circ\text{C}$

Параметры узловых точек цикла приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Параметры	Точки				
	1'	2	3	3'	4
p , кПа					
t , $^\circ\text{C}$					
i , кДж/кг					
ξ , %					
Параметры	Точки				
	5	7	8	9	
p , кПа					
t , $^\circ\text{C}$					
i , кДж/кг					
ξ , %					

Методика расчета

Температура кипения воды в испарителе, °С,

$$t_0 = t_s.$$

Давление кипения воды в испарителе, кПа,

$$p_0 = f(t_0).$$

Давление в абсорбере, кПа,

$$p_a = p_0.$$

Температура конденсации, °С,

$$t_k = t_{o.c.}$$

Давление конденсации, кПа,

$$p_k = f(t_k).$$

Давление в генераторе, кПа,

$$p_h = p_k.$$

Температура раствора на выходе из абсорбера, °С,

$$t_2 = t_k = t_{o.c.}$$

Концентрация слабого раствора, %,

$$\xi_a = f(p_a, t_2).$$

Энтальпия слабого раствора на выходе из абсорбера, кДж/кг,

$$i_2 = f(\xi_a, t_2).$$

Температура крепкого раствора на выходе из теплообменника, °С,

$$t_8 = t_2 = t_k = t_{o.c.}$$

Концентрация кристаллизации крепкого раствора при температуре охлаждающей среды, %,

$$\xi_{\text{кр}} = f(t_8, \text{ линия кристаллизации в } i\text{-}\xi\text{-диаграмме})$$

Максимально допустимая концентрация крепкого раствора, %,

$$\xi_r = \xi_{\text{кр}} - 1.$$

Температура раствора на выходе из генератора, °С,

$$t_4 = f(p_h, \xi_r).$$

Энтальпия раствора на выходе из генератора, кДж/кг,

$$i_4 = f(\xi_r, t_4).$$

Температура греющего источника, °С,

$$t_h = t_4.$$

Зона дегазации, %,

$$\Delta\xi = \xi_a - \xi_r.$$

Кратность циркуляции раствора,

$$a = \frac{\xi_r}{\Delta\xi}.$$

Энтальпия крепкого раствор на выходе из теплообменника, кДж/кг,

$$i_8 = f(\xi_r, t_8).$$

Удельный тепловой поток теплообменника, кДж/кг,

$$q_T = (a - 1) (i_4 - i_8).$$

Энтальпия слабого раствора на выходе из теплообменника, кДж/кг,

$$i_7 = i_2 + \frac{q_T}{a}.$$

Температура слабого раствора на выходе из теплообменника, °С,

$$t_7 = f(\xi_a, t_7).$$

Температура начала процесса кипения раствора, °С,

$$t_5 = f(p_h, t_7 \text{ угол наклона процесса десорбции в } i\text{-}\xi\text{-диаграмме}).$$

Энтальпия пара на выходе из генератора, кДж/кг,

$$i_3' = f(t_4, p_h).$$

Температура начала процесса абсорбции, °С,

$$t_9 = f(p_a, i_8, \text{ угол наклона процесса разделения в } i\text{-}\xi\text{-диаграмме}).$$

Энтальпия пара на выходе из испарителя, кДж/кг,

$$i_1' = f(t_0).$$

Энтальпия рабочего вещества на выходе из конденсатора, кДж/кг,

$$i_3 = f(t_k).$$

Удельный тепловой поток генератора, кДж/кг,

$$q_h = i_3' + (a - 1) i_4 - a i_7.$$

Удельный тепловой поток абсорбера, кДж/кг,

$$q_a = i_1' + (a - 1) i_8 - a i_2.$$

Удельный тепловой поток испарителя, кДж/кг,

$$q_0 = i_1' - i_3.$$

Удельный тепловой поток конденсатора, кДж/кг,

$$q_k = i'_3 - i_3.$$

Теплота, подведенная к АБХМ, кДж/кг,

$$q_{\text{под}} = q_h + q_0.$$

Теплота, отведенная от АБХМ, кДж/кг,

$$q_{\text{отв}} = q_k + q_a.$$

Тепловой коэффициент

$$\zeta = \frac{q_0}{q_h}.$$

1.7. Схема, теоретический цикл, принцип действия и основные процессы абсорбционной водоаммиачной холодильной машины

Схема и теоретический цикл абсорбционной водоаммиачной холодильной машины (АВХМ) представлены на рис. 1.2. В качестве теоретического цикла комбинированного АВХМ принят цикл без теплообменника и ректификатора (см. рис. 1.2, б) [2].

В испарителе (см. рис. 1.2, а) вследствие подвода теплоты внешнего охлаждаемого источника происходит кипение жидкости (хладагента с определенным содержанием абсорбента) при постоянном давлении p_0 . Образовавшийся пар абсорбируется слабым раствором в абсорбере с отводом теплоты абсорбции окружающей средой. В результате абсорбции концентрация раствора по хладагенту увеличивается. Крепкий раствор из абсорбера насосом подается в генератор, где раствор выпаривается за счет подвода теплоты греющего источника. Выпаривание в генераторе происходит при постоянном давлении p_k и уменьшении концентрации раствора по хладагенту до ее значения в начале процесса абсорбции в абсорбере. Концентрация по хладагенту образующегося при этом пара будет значительно выше концентрации кипящего раствора. Пар поступает в конденсатор, где конденсируется. Теплота конденсации отводится окружающей средой. Жидкость, полученная в конденсаторе, дросселируется в дрос-

сильном вентиле хладагента и поступает в испаритель. Слабый раствор, образовавшийся в генераторе, дросселируется в дроссельном вентиле раствора и поступает в абсорбер. Таким образом замыкаются циклы циркуляции раствора и хладагента.

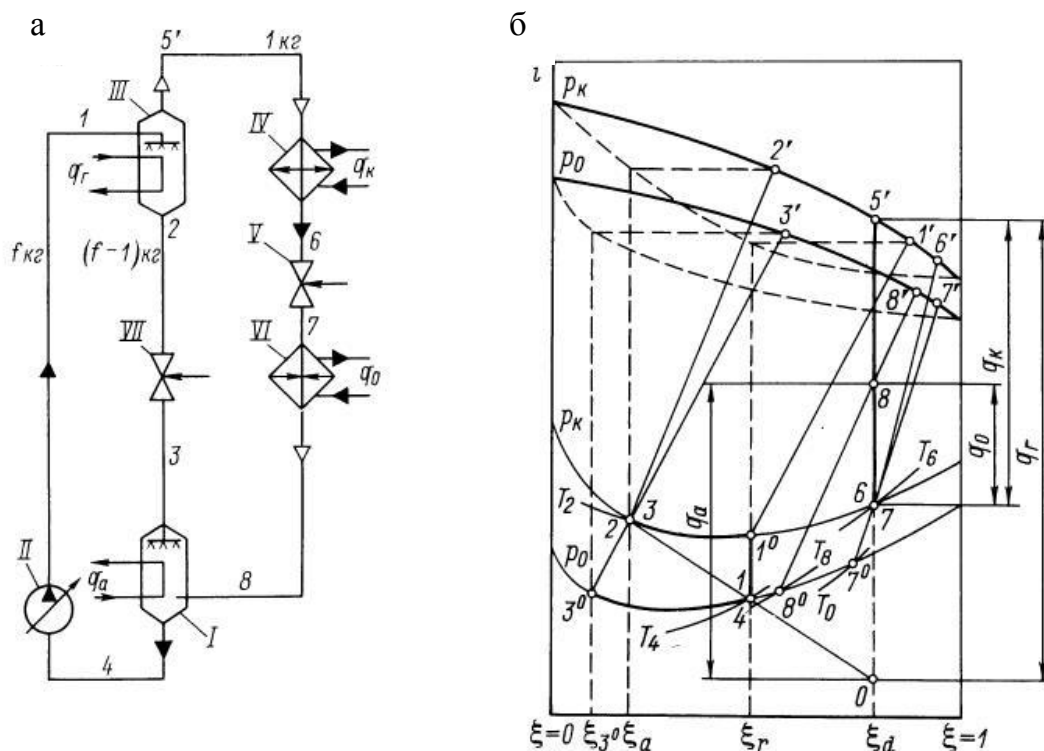


Рис. 1.2. Абсорбционная холодильная машина без теплообменника и ректификатора:

а – схема машины; б – процессы на ξ - i - диаграмме;

I – абсорбер; II – насос раствора; III – генератор; IV – конденсатор;

V – регулирующий вентиль хладагента; VI – испаритель;

VII – регулирующий вентиль раствора

Процессы абсорбции хладагента в абсорбере и выпаривания раствора в генераторе протекают при постоянных давлениях, определяемых давлением кипения жидкости в испарителе p_0 и конденсации жидкости в конденсаторе p_k . Поскольку концентрации растворов в этих процессах переменны, то переменны и температуры растворов. При абсорбции пара в абсорбере концентрация раствора увеличивается по хладагенту (низкокипящему компоненту), а следовательно, температура раствора уменьшается.

В генераторе, наоборот, концентрация раствора по низкокипящему компоненту (хладагенту) уменьшается, а поэтому температура раствора в процессе выпаривания возрастает.

1.8. Методика расчета теоретического цикла абсорбционной водоаммиачной холодильной машины без теплообменника и ректификатора

Исходные данные

Температура греющей среды t_h , °C
 Температура охлаждающей среды t_{w1} , °C
 Температура охлаждаемой среды t_{s2} , °C

Параметры узловых точек цикла приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Состояние вещества	t , °C	p , МПа	ξ , кг/кг	i , кДж/кг
<i>Жидкость</i>				
После генератора (точка 2)				
После абсорбера (точка 4)				
В начале кипения в генераторе (точка 1 ⁰)				
После конденсатора (точка 6)				
В конце кипения в испарителе (точка 8 ⁰)				
<i>Пар</i>				
Равновесный раствору в генераторе: крепкому (точка 1') слабому (точка 2')				
В конце кипения в испарителе (точка 8')				
Выходящий из генератора (точка 5') при $\xi_m = \frac{\xi_a + \xi_r}{2}$				

Методика расчета

Высшая температура кипения раствора в генераторе, °С,

$$t_2 = t_h - \Delta t,$$

где Δt – разность температур, принимаемая равной 10 °С.

Низшая температура конденсации раствора в конденсаторе, °С,

$$t_6 = t_{w1} - \Delta t,$$

где Δt – разность температур, принимаемая равной 5 °С.

Давление в конденсаторе и генераторе, МПа,

$$p_k = p_r = \varphi(T_6);$$

принимается по таблицам для чистого аммиака.

Низшая температура абсорбции раствора в абсорбере при условии параллельной подачи воды в конденсатор и абсорбер, °С,

$$t_4 = t_{w1} - \Delta t,$$

где Δt – разность температур, принимаемая равной 5 °С.

Высшая температура кипения раствора в испарителе, °С,

$$t_8 = t_{s2}.$$

Низшая температура раствора в испарителе (при обязательном условии $\xi_{70} < \xi_d$)

$$t_0 = t_7 = t_{s2} - \Delta t,$$

где Δt – разность температур, принимаемая равной 5 °С.

Давление в испарителе и абсорбере при условии отсутствия аэродинамических сопротивлений между этими аппаратами, МПа,

$$p_0 = p'_0 - \Delta p,$$

где p'_0 – давление насыщенного аммиачного пара при t_0 ;

$$\Delta p = (0,01 \div 0,05) \text{ МПа.}$$

Кратность циркуляции раствора

$$f = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a}.$$

Теплота генератора, кДж/кг,

$$q_{\Gamma} = i'_5 - i_2 + f(i_2 - i_4).$$

Теплота конденсатора, кДж/кг,

$$q_{\Gamma} = i'_5 - i_6.$$

Энтальпия пара на выходе из испарителя, кДж/кг,

$$i_8 = i_k - i_{80} \frac{\xi_k - \xi_d}{\xi_k - \xi_8}.$$

Теплота испарителя, кДж/кг,

$$q_0 = i_8 - i_6.$$

Теплота абсорбера, кДж/кг,

$$q_a = i_8 - i_2 + f(i_2 - i_4).$$

Тепловой баланс:

теплота подведенная, кДж/кг,

$$q_{\text{под}} = q_{\Gamma} + q_0;$$

теплота отведенная, кДж/кг,

$$q_{\text{под}} = q_k + q_a.$$

тепловой коэффициент

$$\zeta = \frac{q_0}{q_{\Gamma}}.$$

Работа насоса крепкого раствора, кДж/кг,

$$l_n = v f (p_k - p_0).$$

Удельный объем крепкого раствора, м³/кг,

$$v = \frac{0,001}{1 - 0,35\xi_r}.$$

2. УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДНОГО РАСТВОРА БРОМИСТОГО ЛИТИЯ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

2.1. Удельная теплоемкость

Определение удельной теплоемкости раствора производится по выражению [3]

$$c_p = 3,6371 - 0,029\xi + 1,4285714 \cdot 10^{-5} (5t + 30\xi - t\xi). \quad (2.1)$$

Формула (3.6) рекомендуется для расчетов при условиях

$$35 \leq t \leq 170 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ и } 50 \leq \xi \leq 70 \text{ } \%.$$

Относительная погрешность, возникающая при аппроксимации исходных данных для c_p с помощью указанной зависимости, находится в пределах 0,06–1,12 % в зависимости от области применения.

2.2. Плотность

В результате экстраполяции для расчета ρ в областях $60 \leq t \leq 170 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $55 \leq \xi \leq 65 \text{ } \%$ рекомендуется зависимость [3]

$$\rho = \overline{1049 + 53,54m - 0,718m^2 - t(0,584 + 0,0146m)} - \frac{5,7 \cdot 10^8}{(t + 273,15)^3}, \quad (2.2)$$

где $m = 11,514 \frac{\xi}{100 - \xi}.$

Относительная погрешность расчета по зависимости (2.2) в наименее благоприятном случае (при $\xi = 65 \%$ и $t = 170^\circ\text{C}$) составляет 0,4–0,5 %.

2.3. Теплопроводность

Для расчета теплопроводности λ рекомендуются следующие зависимости [3]:

при $t \leq 80^\circ\text{C}$

$$\lambda = -3,5552933 + 3,407759 \cdot 10^{-2} T - 9,381419 \cdot 10^{-5} T^2 + 8,834924 \cdot 10^{-8} T^3 + A(\xi), \quad (2.3)$$

где $A(\xi)$ определяется выражением

$$A(\xi) = 0,4923607\xi - 0,422476 \cdot 10^{-2} T\xi + 5,658527 \cdot 10^{-6} T^2\xi - 0,1522615\xi^2 - 1,730562 \cdot 10^{-4} T\xi^2 + 1,895136\xi^3; \quad (2.4)$$

при $t \leq 80^\circ\text{C}$

$$\lambda = -8,8574733 + 6,973969 \cdot 10^{-6} T - 1,694229 \cdot 10^{-4} T^2 + 8,834924 \cdot 10^{-8} T^3 + A(\xi). \quad (2.5)$$

При изменении температуры от 0 до 170°C соотношение теплопроводностей раствора и воды $A = \lambda_{\xi,t}/\lambda_{\xi=0}$ равномерно возрастает на 5 % при $\xi = 50 \%$; на 5,5 % при $\xi = 55 \%$ и на 4 % при концентрации 60 %.

Надежность приведенных оценок подтверждается сравнением относительных величин A , взятых при температурах 30 и 170°C . Для концентрации раствора 60 % указанная величина не превышает 4,5 %.

2.4. Вязкость

Динамический коэффициент вязкости μ водного раствора бромистого лития в диапазоне температур $35 \leq t \leq 70^\circ\text{C}$ и концентраций $55 \leq \xi \leq 60 \%$ определяется по выражению [3]:

$$\mu = \left[1,8793 - 0,025765\xi - 0,035t + 0,004\xi t + \frac{-169,263 + 6,989\xi}{t + 223,95 - 3,63\xi} \right] \cdot 10^{-3}, \quad (2.6)$$

а при $70 \leq t \leq 180$ °С и $55 \leq \xi \leq 60$ % – по выражению

$$\mu = \left[-0,5707 + 0,009235\xi + \frac{-169,263 + 6,989\xi}{t + 223,95 - 3,63\xi} \right] \cdot 10^{-3}. \quad (2.7)$$

Расхождение зависимостей (2.6) и (2.7) при экстраполяции до 140–150 °С составляет 10 %, а при экстраполяции до 170–180 °С находится в пределах 15–20 %.

2.5. Поверхностное натяжение

Поверхностное натяжение σ определяется по аппроксимационному уравнению (Н/м) [3]

$$\sigma = \frac{A_1 + A_2T + A_3T^2 + A_4T^3 + A_5\xi + A_6T\xi + A_7T^2\xi}{100} + \frac{A_8\xi^2 + A_9T\xi^2 + A_{10}\xi^3}{100}. \quad (2.8)$$

Значения постоянных коэффициентов выражения (2.8) приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Обозначение величины	Числовое значение	Обозначение величины	Числовое значение
A1	21,54266	A6	$2,52345 \cdot 10^{-3}$
A2	$-9,79993 \cdot 10^{-2}$	A7	$4,199336 \cdot 10^{-5}$
A3	$2,314404 \cdot 10^{-4}$	A8	5,968984
A4	$-2,17009 \cdot 10^{-7}$	A9	$-3,000691 \cdot 10^{-2}$
A5	-2,020992	A10	7,308868

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТА

1. Абсорбционные холодильные машины

Общая характеристика и принцип действия абсорбционной холодильной машины (АХМ). Принцип совмещения прямого и обратного циклов в АХМ. Тепловой баланс простейшей АХМ. Тепловой коэффициент АХМ. Рабочие вещества и абсорбенты, применяемые в абсорбционных холодильных машинах, их термодинамические характеристики. Законы Коновалова. Основы теории термодинамического равновесия. Ингибиторы коррозии и поверхностно-активные вещества. Теплофизические, физико-химические и физиологические свойства рабочих веществ и основные уравнения для расчета их термодинамических и теплофизических свойств.

Литература: [4, с. 183–189].

Методические указания

При изучении этого раздела темы необходимо ознакомиться с принципом действия АХМ и характером процессов, а также с изображением их в термодинамических диаграммах. Необходимо уяснить принцип и условия совмещения прямого и обратного циклов, принцип составления теплового баланса машины и определения энергетической эффективности циклов простейшей АХМ.

Вопросы и задания для самопроверки

Изобразите схему простейшей АХМ.

Уясните принцип и условия совмещения прямого и обратного циклов в АХМ.

Составьте тепловой баланс и определите значение теплового коэффициента простейшей схемы АХМ.

1.1. Абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины

Схема и теоретический цикл в диаграмме концентрация–энтальпия ($\xi-i$) абсорбционной бромистолитиевой холодильной маши-

ны (АБХМ). Рабочая схема АБХМ с одноступенчатой генерацией пара рабочего вещества и совмещенным тепломассопереносом в аппаратах. Схема и теоретический цикл АБХМ с одноступенчатой генерацией рабочего вещества и отдельным тепломассопереносом в абсорбере. Схема и теоретический цикл АБХМ с двухступенчатой генерацией пара рабочего вещества и прямоточным движением раствора через ступени генератора. Схема и теоретический цикл АБХМ с двухступенчатой генерацией пара рабочего вещества и параллельным движением раствора через ступени генератора. Основные необратимые потери действительных процессов АБХМ и способы их снижения. Энергетическая эффективность АБХМ. Безнасосная АБХМ. Особенности монтажа и эксплуатации АБХМ.

Литература: [3, с. 81–113]; [4, с. 189–226].

Методические указания

При изучении этого подраздела необходимо освоить методику составления тепловых и материальных балансов и теплового расчета всех указанных схем машины. Необходимо обратить внимание на особенности, связанные с применением в этих машинах воды в качестве рабочего вещества и бромистого лития как абсорбента.

Необходимо уяснить схему и принцип работы безнасосных АБХМ.

Вопросы и задания для самопроверки

Изобразите различные схемы АБХМ и их процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. Проставьте узловые точки цикла в диаграмме и на соответствующей схеме.

От чего зависит выбор той или иной схемы АБХМ?

Составьте тепловой баланс конкретной схемы АБХМ и определите значение теплового коэффициента.

Назовите и обоснуйте области применения АБХМ.

Объясните принцип действия безнасосной АБХМ.

Объясните особенности монтажа и эксплуатации АБХМ.

1.2. Абсорбционные водоаммиачные холодильные машины

Абсорбционная водоаммиачная холодильная машина (АВХМ) без теплообменника растворов и ректификатора. Схема машины и процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. АВХМ с теплообменником растворов. Схема машины и процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. АВХМ с теплообменником растворов и дефлегматором, охлаждаемым водой. Схема машины и процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. АВХМ с теплообменником растворов и дефлегмацией пара крепким раствором до его поступления в теплообменник растворов. Схема машины и процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. АВХМ с ректификацией пара частью крепкого раствора, отводимого в генератор помимо теплообменника растворов. Схема машины и процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. АВХМ с ректификацией пара частью жидкого рабочего вещества, отводимого из конденсатора. Схема машины и процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. АВХМ с обратной подачей раствора через абсорбер и генератор. Схема машины и процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме для жидкой фазы раствора. Парожид-костный теплообменник АВХМ. Схема включения и процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. Двухступенчатая АВХМ. Схема машины и процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. АВХМ с материальной регенерацией. Схема машины и процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. АВХМ со ступенчатым абсорбером. Схема машины, АВХМ с узлом превышения температур. Схема машины и процессы для жидкой фазы раствора в $(\xi-i)$ -диаграмме. Одноступенчатая водоаммиачная абсорбционно-резорбционная холодильная машина. Схема машины и процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. Двухступенчатая водоаммиачная абсорбционно-резорбционная холодильная машина. Схема машины. АВХМ периодического действия. Схема машины. Абсорбционная водоаммиачная безнасосная холодильная машина непрерывного действия с инертным газом. Схема машины.

Литература: [3, с. 114–124]; [4, с. 226–248, 255–258].

Методические указания

При изучении данного подраздела необходимо освоить методику составления тепловых и материальных балансов и теплового расчета всех указанных схем машины. Необходимо проанализировать

все схемы ректификации аммиачного пара и оценить их энергетическую эффективность.

При рассмотрении безнасосных абсорбционных машин особое внимание должно быть уделено схеме и принципу действия водоаммиачной холодильной машины непрерывного действия с инертным газом, применяемой в бытовых холодильниках, а также машинам периодического действия.

Вопросы и задания для самопроверки

Изобразите различные схемы АВХМ и их процессы в $(\xi-i)$ -диаграмме. Проставьте узловые точки цикла в диаграмме и на соответствующей схеме.

Составьте тепловой и материальный балансы каждой из приведенных схем АВХМ и определите значение теплового коэффициента в любом выбранном произвольно температурном режиме работы машины.

Объясните принцип работы безнасосных АВХМ периодического и непрерывного действия.

2. Аппараты теплоиспользующих холодильных машин

Типы, конструкции и основные методики расчетов парожетторных холодильных машин и агрегатов.

Типы, конструкции и основные методики расчетов аппаратов абсорбционных холодильных машин и агрегатов.

Литература: [4, с. 804–823].

Методические указания

В данном разделе необходимо усвоить особенности конструкций аппаратов парожетторных и абсорбционных холодильных машин. Следует разобраться в отличии конструкций смешивающих и поверхностных конденсаторов парожетторных холодильных машин и усвоить методику расчета каждого типа аппаратов. Следует уяснить особенность конструкции испарителей со встроенными эжекто-

рами и испарителей без теплопередающей поверхности, а также вертикальных двухступенчатых испарителей.

Необходимо выяснить различия между аппаратами АБХМ и АВХМ.

Вопросы и задания для самопроверки

Какие конструкции конденсаторов и испарителей используются в парожетторных холодильных машинах?

Почему в АБХМ аппараты объединены в два блока: в одном корпусе испаритель и абсорбер, в другом – генератор и конденсатор?

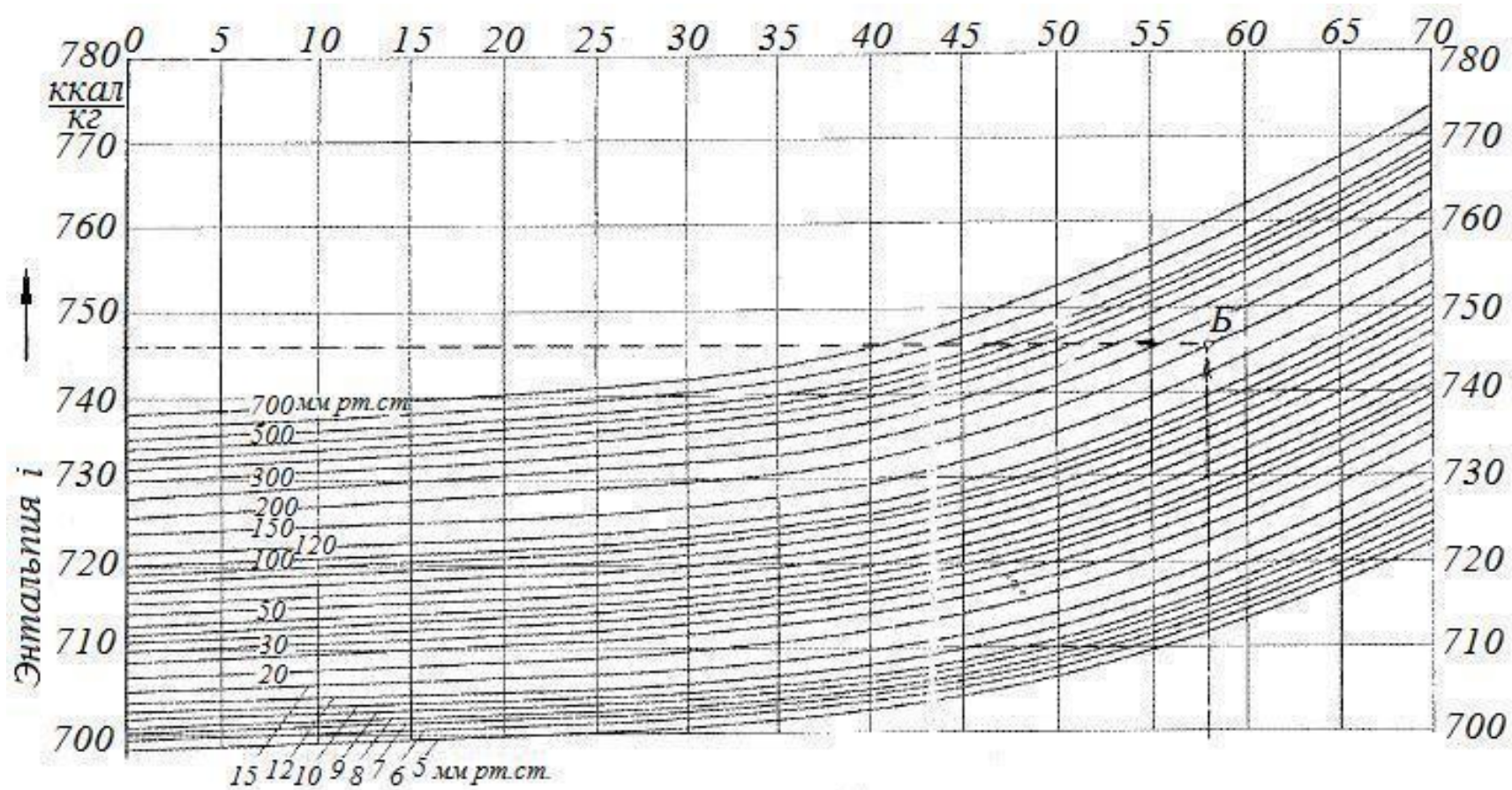
Почему в АВХМ применяется ректификация водоаммиачного пара перед поступлением его в конденсатор?

Какие конструкции генераторов и абсорберов применяются в АВХМ?

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Диаграмма водного раствора бромистого лития в координатах $\xi-i$



Окончание

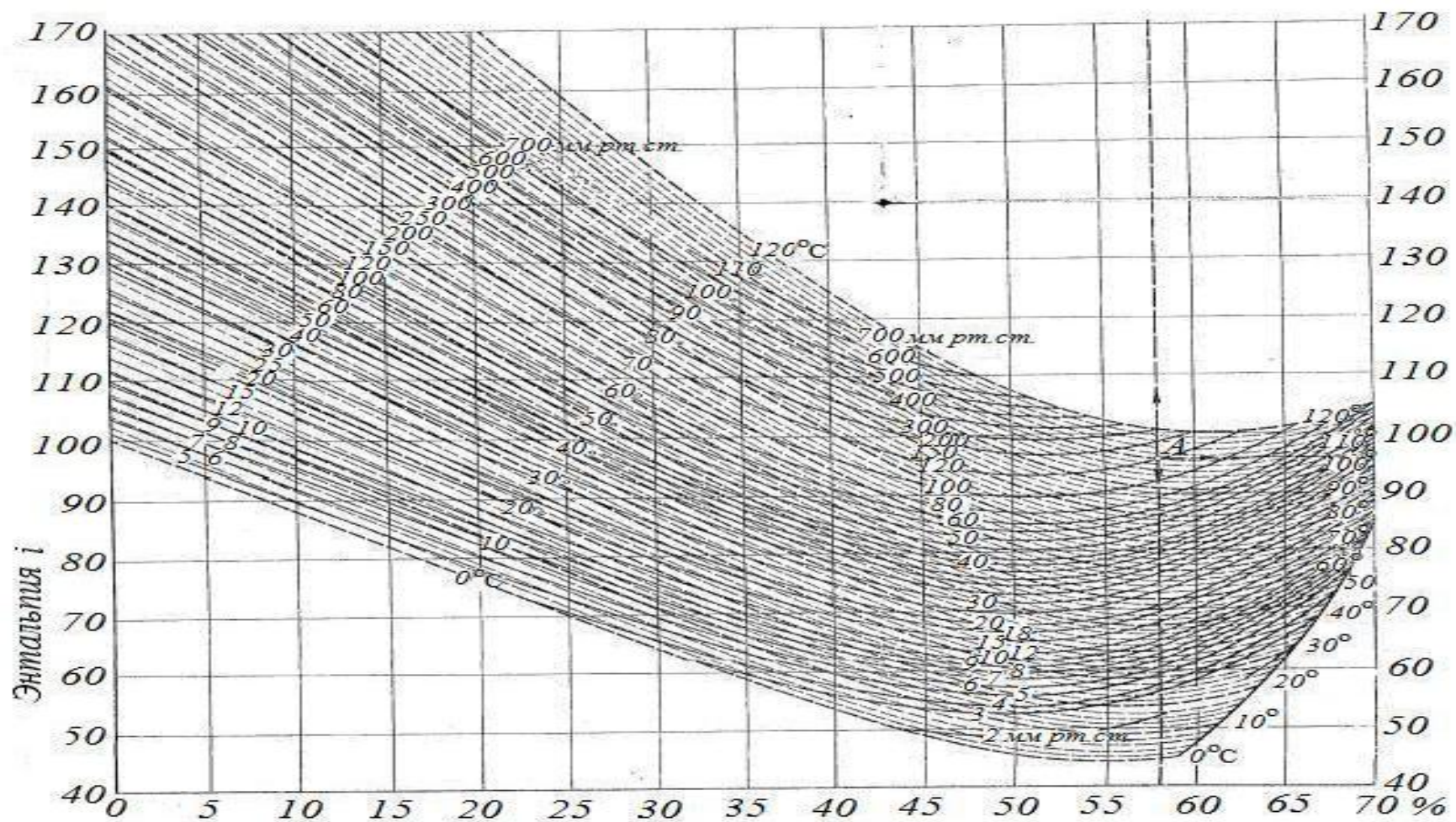
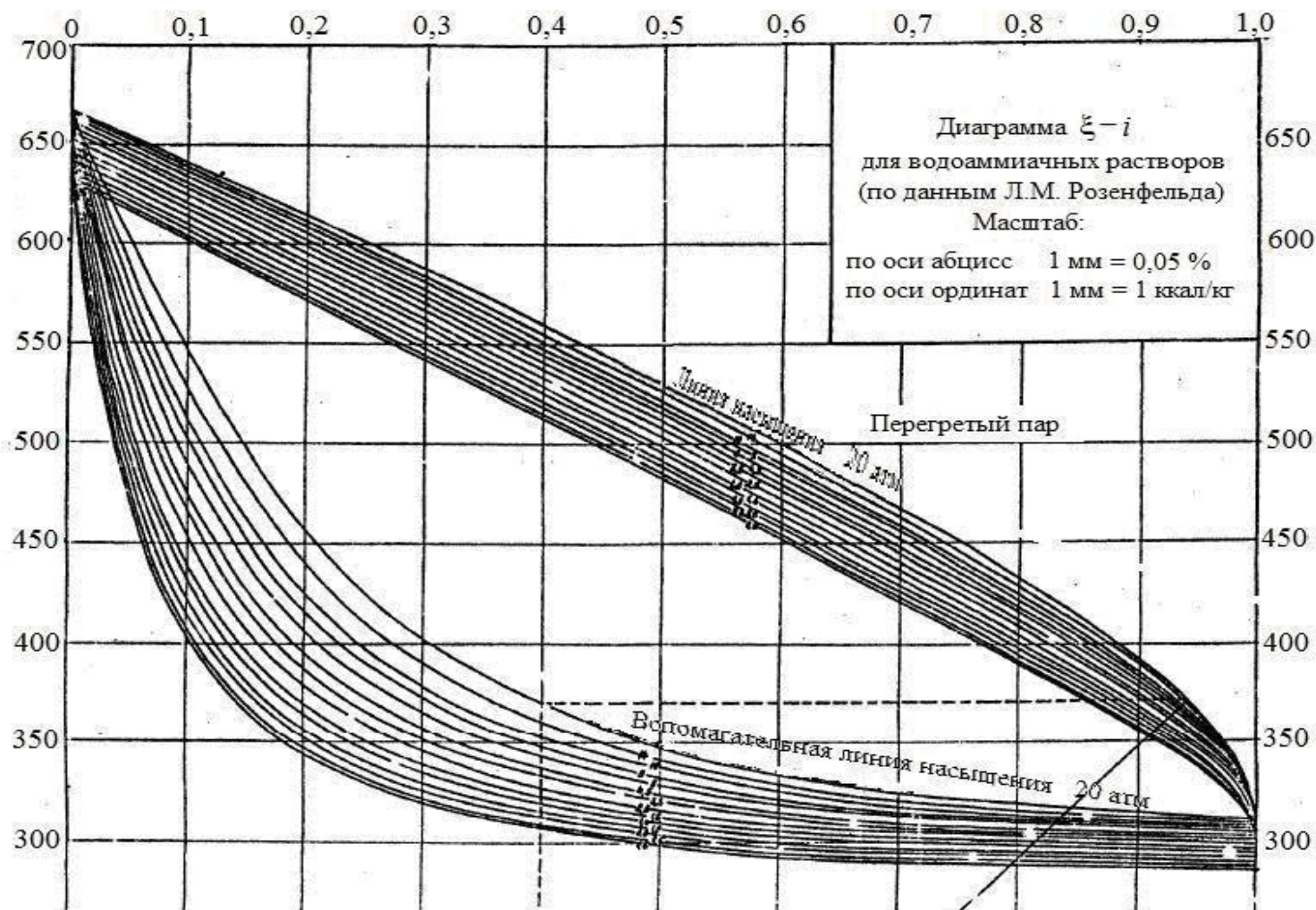
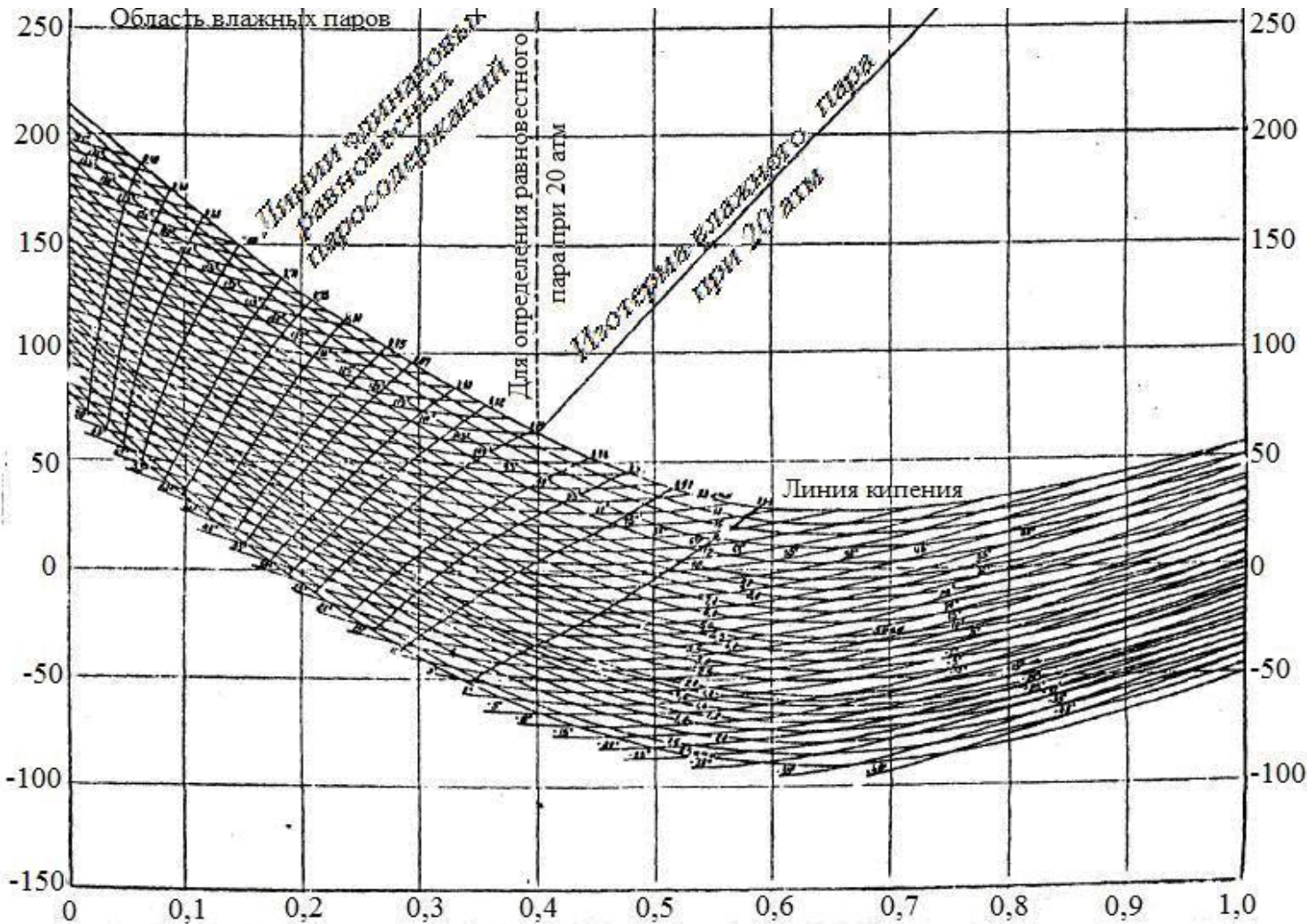


Диаграмма водоаммиачного раствора в координатах $\xi-i$



Окончание



Давление пара водного раствора бромистого лития [5]

ξ , %	Значение p , кПа в зависимости от t , °С													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
0	0,6106	1,2266	2,3371	4,2410	7,3754	12,335	19,918	31,171	47,356	70,114	101,33	143,32	198,52	270,11
5	0,5986	1,2012	2,2931	4,1596	7,2260	12,079	19,518	30,544	46,409	68,714	99,32	140,39	194,65	264,91
10	0,5813	1,1666	2,2398	4,0396	7,0261	11,746	18,972	29,691	45,129	66,794	96,66	136,66	189,45	257,98
15	0,5586	1,1226	2,1465	3,8800	6,7594	11,306	18,265	28,598	43,463	64,394	93,19	131,86	182,65	248,91
20	0,5306	1,0666	2,0265	3,6930	6,4261	10,759	17,398	27,198	41,463	61,461	88,93	125,86	174,65	237,85
25	0,4933	0,9946	1,8798	3,4530	6,0128	10,066	16,292	25,598	38,930	57,595	83,46	118,26	164,12	223,85
30	0,4453	0,8986	1,6932	3,1331	5,4529	9,159	14,839	23,331	35,464	52,662	76,53	108,39	150,79	206,65
35	0,3853	0,7773	1,4932	2,7198	4,7463	7,999	12,986	20,398	31,197	46,529	67,73	96,26	134,12	183,98
40	0,3120	0,6333	1,2132	2,2265	3,9200	6,613	10,799	17,065	26,264	39,197	57,33	81,73	114,39	158,65
45	0,2293	0,4693	0,9066	1,6798	2,9731	5,066	8,333	13,279	20,532	31,064	45,60	65,59	92,39	130,66
50	0,1466	0,3040	0,5933	1,1199	2,0132	3,480	5,826	9,426	14,799	22,665	33,60	48,66	69,06	94,66
55	0,0773	0,1663	0,3360	0,6533	1,1999	2,133	3,640	6,026	9,266	14,332	21,73	32,00	46,66	66,66
60	—	0,0813	0,1733	0,3600	0,6933	1,253	2,133	3,586	5,799	9,199	14,13	21,33	31,20	45,06
65	—	—	—	0,2000	0,3933	0,727	1,293	2,200	3,666	5,733	8,80	13,33	19,73	28,53
70	—	—	—	—	—	—	—	1,260	2,106	3,440	5,40	8,27	12,13	17,46

Энтальпия водного раствора бромистого лития [5]

ξ , %	Значение h , кДж/кг в зависимости от t , °C													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
0	418,7	460,5	502,4	544,3	586,2	628,0	669,9	711,8	753,6	795,5	837,8	880,1	922,4	965,1
5	392,7	432,1	471,8	511,2	550,6	590,3	629,7	669,5	708,8	748,2	788,0	829,0	868,3	908,5
10	367,2	404,4	441,7	478,1	515,4	552,7	589,9	627,6	664,4	702,1	739,4	778,3	814,8	852,8
15	342,1	376,8	411,1	445,9	481,1	516,2	551,0	586,2	621,3	656,5	692,1	727,7	762,8	798,8
20	317,8	349,2	381,4	414,1	446,7	479,8	512,5	545,5	578,6	611,7	644,8	678,7	711,3	744,4
25	293,5	322,8	352,5	383,5	413,7	444,6	475,6	506,2	537,2	568,1	598,7	630,5	661,1	692,9
30	270,5	297,3	324,9	353,4	381,4	410,7	439,2	468,1	496,6	525,9	554,8	584,1	612,9	642,2
35	247,8	272,6	298,1	324,5	350,8	377,6	404,4	431,2	458,4	485,2	512,0	539,7	566,5	593,3
40	227,3	249,5	273,0	297,7	322,4	347,5	372,2	397,3	422,4	448,0	472,7	498,6	523,4	548,5
45	208,9	229,4	251,2	273,8	297,3	320,3	343,7	367,2	391,0	414,1	437,9	461,8	485,2	508,7
50	195,1	213,9	234,0	255,4	276,7	298,5	321,1	343,3	365,9	388,5	411,6	434,6	457,6	480,6
55	189,2	206,4	225,7	245,3	265,9	286,4	307,3	328,7	350,0	371,4	393,1	414,9	436,7	458,0
60	—	209,8	227,3	245,8	265,4	285,1	304,8	324,9	345,0	365,5	386,0	406,1	427,0	447,6
65	—	—	—	254,6	270,9	289,7	309,4	328,2	347,1	365,5	385,2	404,9	424,1	443,0
70	—	—	—	—	—	—	—	335,4	352,5	370,5	388,1	406,1	423,7	440,4

**Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения
(по температурам) [5]**

t , °C	T , К	p , кПа	v' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	v'' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	h' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	s' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	s'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
0	273,15	0,6108	1,0002	206,321	-0,04	2501,0	2501,0	-0,0002	9,1565	9,1567
5,0	278,15	0,8718	1,0000	147,167	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0258	8,9496
10,0	283,15	1,2271	1,0003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009	8,7499
15,0	288,15	1,7041	1,0008	77,970	62,94	2528,6	2465,7	0,2243	8,7815	8,5572
20,0	293,15	2,3368	1,0017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674	8,3711
25,0	298,15	3,1663	1,0029	43,399	104,77	2546,8	2442,0	0,3670	8,5583	8,1913
30,0	303,15	4,2417	1,0043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537	8,0172
35,0	308,15	5,6217	1,0060	25,246	146,56	2565,0	2418,4	0,5049	8,3536	7,8487
40,0	313,15	7,3749	1,0078	19,548	167,45	2574,0	2406,5	0,5721	8,2576	7,6855
45,0	318,15	9,5817	1,0099	15,278	188,35	2582,9	2394,5	0,6383	8,1655	7,5272
50,0	323,15	12,335	1,0121	12,048	209,26	2591,8	2382,5	0,7035	8,0771	7,3736

Окончание

t , °C	T , К	p , кПа	v' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	v'' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	h' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	s' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	s'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
55,0	328,15	15,740	1,0145	9,5812	230,17	2600,7	2370,5	0,7677	7,9922	7,2245
60,0	333,15	19,919	1,0171	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106	7,0796
65,0	338,15	25,008	1,0199	6,2042	272,02	2618,2	2346,2	0,8933	7,8320	6,9387
70,0	343,15	31,161	1,0228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565	6,8017
75,0	348,15	38,548	1,0259	4,1356	313,94	2635,3	2321,4	1,0154	7,6837	6,6683
80,0	353,15	47,359	1,0292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135	6,5383
85,0	358,15	57,803	1,0326	2,8300	355,92	2652,1	2296,2	1,1343	7,5459	6,4116
90,0	363,15	70,108	1,0361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805	6,2880
95,0	368,15	84,525	1,0398	1,9832	397,99	2668,4	2270,4	1,2500	7,4174	6,1674
100,0	373,15	101,325	1,0437	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564	6,0495

Приложение 6

Термодинамические свойства хладагента R717 (аммиак) в состоянии насыщения [5]

t , °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	v' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	v'' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	h' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	s' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	s'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
–70	0,10920	1,379	9,0253	187,5	1656,8	1469,3	0,6826	7,9150
–65	0,15603	1,390	6,4641	209,3	1665,8	1456,5	0,7887	7,7861
–60	0,21873	1,401	4,7103	331,2	1674,7	1443,5	0,8925	7,6649
–55	0,30127	1,412	3,4916	253,1	1683,5	1430,3	0,9941	7,5507
–50	0,4082	1,424	2,6288	275,1	1692,0	1416,8	1,0938	7,4430
–45	0,5448	1,436	2,0072	297,2	1700,2	1403,0	1,1915	7,3411
–40	0,7169	1,449	1,5530	319,4	1708,3	1388,9	1,2874	7,2446
–35	0,9310	1,462	1,2162	341,6	1716,0	1374,4	1,3816	7,1529
–30	1,1945	1,475	0,9634	363,9	1723,5	1359,6	1,4742	7,0658
–25	1,5151	1,489	0,7710	386,3	1730,3	1344,4	1,5653	6,9828
–20	1,9014	1,504	0,6230	408,8	1737,5	1328,7	1,6548	6,9035
–15	2,3625	1,518	0,5081	431,4	1744,1	1312,6	1,7431	6,8277
–10	2,9083	1,534	0,4179	454,2	1750,2	1296,1	1,8299	6,7552
–5	3,5491	1,550	0,3463	477,0	1756,1	1279,0	1,9136	6,6955

Окончание

t , °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	ν' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	ν'' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	h' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	s' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	s'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
0	4,296	1,566	0,2890	500,0	1761,5	1261,5	2,0000	6,6185
5	5,160	1,583	0,2428	523,1	1766,6	1243,5	2,0834	6,5539
10	6,153	1,601	0,2052	546,4	1771,2	1224,8	2,1658	6,4915
15	7,288	1,619	0,1745	569,8	1775,4	1205,0	2,2472	6,4312
20	8,578	1,639	0,1491	593,5	1779,2	1185,8	2,3278	6,3727
25	10,035	1,659	0,1280	617,3	1782,5	1165,2	2,4075	6,3157
30	11,675	1,680	0,1104	641,3	1785,3	1144,0	2,4866	6,2602
35	13,510	1,702	0,0957	665,6	1787,6	1121,9	2,5650	6,2059
40	15,555	1,726	0,0831	690,2	1789,2	1099,1	2,6429	6,1526
45	17,826	1,751	0,0725	715,0	1790,3	1075,3	2,7204	6,1002
50	20,337	1,777	0,0634	740,2	1790,7	1050,5	2,7975	6,0483
55	23,106	1,804	0,0556	765,7	1790,4	1024,7	2,8743	5,9969
60	26,147	1,834	0,0489	791,6	1789,2	997,6	2,9510	5,9455
65	29,478	1,866	0,0430	818,0	1787,2	969,3	3,0277	5,8941
70	33,117	1,900	0,0379	844,8	1784,2	939,4	3,1045	5,8422

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дзино А.А., Малинина О.С. Системы прямых и обратных термодинамических циклов для получения тепла и холода // VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» Ч. I: Материалы конференции. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – С. 141–144.

2. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин, тепловых насосов и термотрансформаторов. Ч. 1. Расчет циклов, термодинамических и теплофизических свойств рабочих веществ: Учеб. пособие / Л.С. Тимофеевский, В.И. Пекарев, Н. Н. Бухарин и др.; Под ред. Л.С. Тимофеевского. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. – 260 с.

3. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин: Учеб. пособие / Под общ. ред. И.А. Сакуна. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 423 с.

4. Холодильные машины: Учеб. / Под ред. Л.С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 2006. – 944 с.

5. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ. 4-е изд., перераб. и доп. / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова; Под ред. С.Н. Богданова. – СПб.: СПбГАХПТ, 1999. – 320 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ	4
1. АБСОРБЦИОННЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ	4
2. УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДНОГО РАСТВОРА БРОМИСТОГО ЛИТИЯ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ	19
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТА	22
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	27
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	37

Дзино Анатолий Аполлонович
Малинина Ольга Сергеевна

АБСОРБЦИОННЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Е.О. Трусова

Компьютерная верстка
Н.В. Гуральник

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

*Печатается
в авторской редакции*

Подписано в печать 26.12.2016. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 2,33. Печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,25
Тираж 50 экз. Заказ № С 64

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9