

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.А. Дзино, О.С. Малинина

**ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИЕ
ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ**

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2015

УДК 621.575

Дзино А.А., Малинина О.С. Теплоиспользующие холодильные машины: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 70 с.

Приводятся теоретический материал, методические указания к самостоятельной работе по дисциплине «Теплоиспользующие холодильные машины».

Предназначено для студентов направления 16.03.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения» очной формы обучения.

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

Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 3 от 30.11.2015 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, 2015

© Дзино А.А., Малинина О.С., 2015

ВВЕДЕНИЕ

Целью преподавания дисциплины «Теплоиспользующие холодильные машины» является изучение студентами физических основ получения низких температур за счет теплоты различных температурных потенциалов в теплоиспользующих холодильных машинах, их процессов, термодинамических циклов, схем и конструкции.

На самостоятельную работу студентов выносятся некоторые разделы программы, которые носят описательный характер или незначительно отличаются от тем, рассматриваемых на лекциях.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

1. ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

1.1. Классификация теплоиспользующих холодильных машин

Теплоиспользующие холодильные машины нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. К ним относятся парожетторные (ПЭХМ), абсорбционные (АХМ) и сорбционные холодильные машины. Отличительной особенностью перечисленных типов машин от пароконпрессорных и газовых холодильных машин является принцип получения в них холода за счет использования теплоты греющих источников. Для привода насосов в ПЭХМ и АХМ необходимо небольшое количество электроэнергии, которое практически не учитывают в их тепловых балансах. В ПЭХМ и АХМ искусственный холод вырабатывается с помощью системы совмещенных прямого и обратного циклов.

В ПЭХМ совмещены парожетторная установка с двигателем-жеттором и холодильная машина со струйным компрессором-жеттором. Парожетторная установка включает в себя парогенератор, жеттор, конденсатор и насос. В состав холодильной машины входят жеттор, конденсатор, дроссельный (регулирующий) вентиль и испаритель.

В теоретической схеме АХМ функцию парожетторной установки выполняют генератор, расширительная машина (турбина), абсорбер, насос и растворный детандер. Функцию холодильной

машины выполняют испаритель, компрессор, конденсатор и детандер. В действительной схеме АХМ расширительная машина в прямом цикле и компрессор – в обратном взаимно исключают друг друга, а детандеры заменяются на дроссельные вентили. В результате получается единый контур теплоиспользующей машины – АХМ с совмещенными прямым и обратным циклами. Одним из основных процессов АХМ является абсорбция, которая в общем виде представляет собой поглощение газа (пара) жидким поглотителем (абсорбентом). В абсорбционных процессах участвуют две фазы – жидкая и газовая, и происходит переход вещества из газовой фазы в жидкую. Таким образом, абсорбционные процессы являются одним из видов процессов массопередачи. В абсорбционных холодильных машинах абсорбция пара хладагента сопровождается выделением теплоты, следовательно, в данном случае происходит одновременный массо- и теплоперенос.

Аналогично теплопереносу массоперенос является сложным процессом, состоящим из процессов переноса вещества в пределах каждой из фаз и переноса вещества через границу раздела фаз. Поэтому при протекании абсорбционных процессов поверхность соприкосновения фаз должна быть как можно большей, что реализуется в конструкциях абсорбционных аппаратов.

Движущей силой процесса переноса вещества является отклонение системы от равновесия. Применительно к АХМ в паровой фазе ею является разность давлений пара хладагента в общем объеме и непосредственно у поверхности соприкосновения фаз, в жидкой фазе – разность концентраций хладагента у поверхности контакта фаз и в общем объеме абсорбента.

Вследствие разности давлений молекулы пара подлетают к поверхности соприкосновения фаз и захватываются (притягиваются) абсорбентом. Это происходит в результате того, что в растворе между молекулами абсорбента и хладагента всегда имеет место физическое взаимодействие, выражающееся во взаимном притяжении молекул. На поверхности абсорбента пар хладагента превращается в жидкость с выделением теплоты фазового перехода. И далее жидкий хладагент в результате наличия градиента концентраций растворяется в абсорбенте с выделением теплоты растворения. Таким образом, теплота абсорбции на 1 кг хладагента в основном включает в себя удельную теплоту конденсации хладагента

и дифференциальную теплоту растворения хладагента в абсорбенте.

При абсорбции чистых компонентов, что имеет место в АХМ, сопротивление переносу массы преимущественно определяется сопротивлением жидкой фазы, зависящим, как правило, от молекулярной и конвективной диффузий хладагента в абсорбенте.

Эффективность применения теплоиспользующих холодильных машин в значительной степени зависит от стоимости теплоты греющих источников, требуемых температурных потенциалов и практически всегда является высокой при использовании вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), а также при одновременной выработке холода и теплоты.

2. ПАРОЭЖЕКТОРНЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Рабочим веществом ПЭХМ преимущественно является вода, которая экологически безопасна, доступна, имеет невысокую стоимость. Отсасывание водяного пара из испарителя паровым эжектором позволило создать относительно компактную и надежную в эксплуатации машину.

Недостатками ПЭХМ являются низкая энергетическая эффективность из-за больших потерь в эжекторе, а также необходимость поддержания глубокого вакуума в испарителе, конденсаторе и пароструйном аппарате.

Наиболее широко ПЭХМ применяют в системах кондиционирования воздуха на судах с парогенераторными энергетическими установками, а также на промышленных предприятиях, располагающих вторичными энергетическими ресурсами повышенного температурного потенциала.

2.1. Энергетическая эффективность пароэжекторных холодильных машин [1]

Эффективность работы прямого цикла оценивается термическим коэффициентом

$$\eta_t = \frac{l}{q_{\Gamma}} . \quad (1.1)$$

Холодильный коэффициент является энергетической характеристикой обратного цикла:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_0}. \quad (1.2)$$

Для энергетической оценки эффективности всей машины используют тепловой коэффициент ζ_T , равный отношению холодопроизводительности цикла к затраченной теплоте:

$$\zeta_T = \frac{q_0}{a_T q_T}. \quad (1.3)$$

Подставив в формулу (1.1) $l = l_0/a_T$ и умножив η_T на ε_T , получим

$$\eta \varepsilon_T = \frac{l_0 q_0}{a_T q_T l_0} = \frac{q_0}{a_T q_T} = \zeta_T. \quad (1.4)$$

Термодинамическое совершенство цикла эжекторной холодильной машины так же, как и для других типов холодильных машин, можно оценить коэффициентом обратимости

$$\eta_{об} = \frac{\varepsilon_T}{\zeta_{об}} = \frac{\varepsilon_T \eta_t}{\varepsilon_{об} \eta_{t_{об}}} \quad (1.5)$$

Здесь ζ_T , ε_T и η_t (соответственно тепловой, холодильный и термический коэффициенты теоретического цикла; $\zeta_{об}$, $\varepsilon_{об}$ и $\eta_{t_{об}}$ – те же коэффициенты обратимого цикла,

$$\varepsilon_{об} = \frac{T_0}{T_{о.с} - T_0}; \quad (1.6)$$

$$\eta_{t_{об}} = \frac{T_h - T_{о.с}}{T_h}, \quad (1.7)$$

где T_0 – температура охлажденной воды на выходе из испарителя, К; $T_{о.с}$ – температура окружающей среды, К; T_h – температура греющего источника, К.

2.2. Схема, теоретический цикл, принцип действия и основные процессы парожеторной холодильной машины

Парожеторная машина представляет собой систему совмещенных неразделимых процессов прямого и обратного циклов, т.е. в ней совмещены парожеторная установка с двигателем-жетором и холодильная машина со струйным компрессором-жетором. Парожеторная установка включает в себя парогенератор, жетор, конденсатор и насос. В состав холодильной машины входят жетор, конденсатор, регулирующий вентиль и испаритель.

Схема парожеторной машины показана на рис. 1.1.

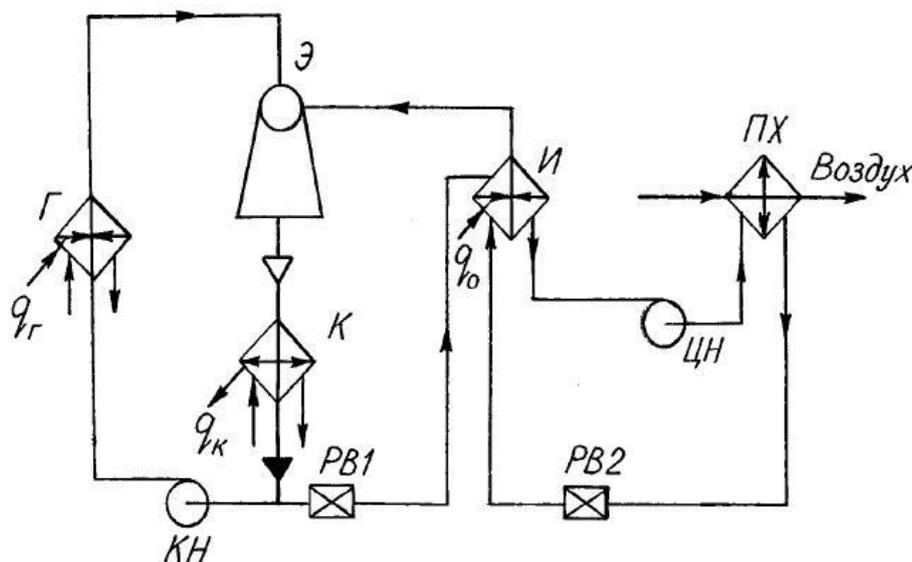


Рис. 1.1. Схема парожеторной холодильной машины

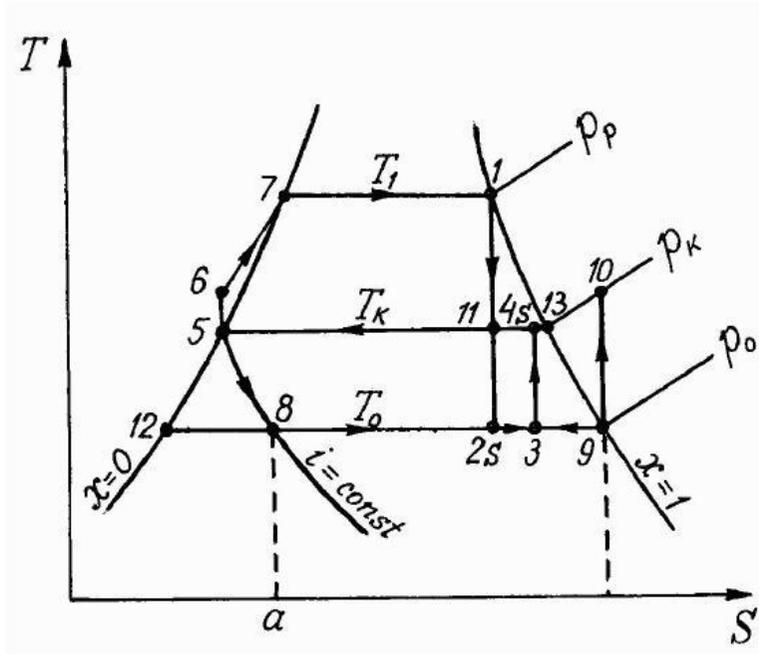
Рабочий пар из парогенератора Г, образованный в нем за счет подвода теплоты q_g , направляется в сопло жетора Э. В сопле потенциальная энергия пара преобразуется в кинетическую энергию – скорость пара возрастает. При этом давление рабочего пара понижается до значения меньшего, чем значение давления пара в испарителе. Вследствие этого происходит отсасывание (жеторирование) холодного пара из испарителя. Струя рабочего пара, увлекая холодный пар, идущий из испарителя И, смешивается с ним в камере

смешения эжектора. Смесь рабочего и холодного пара направляется в диффузор эжектора, в котором давление смеси повышается вследствие снижения скорости. Таким образом, за счет кинетической энергии струи рабочего пара осуществляется работа сжатия смеси рабочего и холодного пара от давления в испарителе p_0 до давления в конденсаторе p_k . Теплота конденсации q_k в конденсаторе ГК отводится водой, а образовавшийся конденсат направляется по двум потокам: одна часть конденсата в количестве, равном массе рабочего пара, подается конденсатным насосом КН в парогенератор Г, другая – через дроссельный вентиль РВ1 поступает в испаритель И. Вода в испарителе охлаждается в результате ее частичного испарения при глубоком вакууме. Количество теплоты, отводимой холодным паром, зависит от удельной теплоты парообразования воды при давлении и температуре в испарителе и расхода холодного пара. Из испарителя И образующийся пар непрерывно отсасывается эжектором, благодаря чему в испарителе поддерживаются постоянное давление и непрерывный процесс испарения. Охлажденная вода, называемая «рабочей водой», циркулирует между испарителем И и потребителем холода ПХ. Рабочая вода подается к потребителю холода циркуляционным насосом ЦН, в испаритель она возвращается через вентиль РВ2.

Теоретический совмещенный цикл ПЭХМ на $s - T -$ и $s - i -$ диаграммах, а также прямой и обратный циклы на $s - T -$ диаграмме показаны на рис. 1.2. Рабочий пар с давлением p_p расширяется в сопле до давления p_0 изоэнтропно – процесс $1 - 2s$. Из испарителя подсасывается холодный пар состояния 9. В камере смешения образуется влажный пар состояния 3, который сжимается в диффузоре до давления p_k изоэнтропно – процесс $3 - 4s$.

Процесс $4s - 5$ – конденсация; процесс $5 - 6$ соответствует адиабатной работе насоса, перекачивающего конденсат в парогенератор. Процесс $5 - 8$ – дросселирование части конденсата, идущего в испаритель. Процесс $8 - 9$ – кипение в испарителе, а $6 - 7 - 1$ – процессы нагрева воды и парообразования в парогенераторе.

а



б

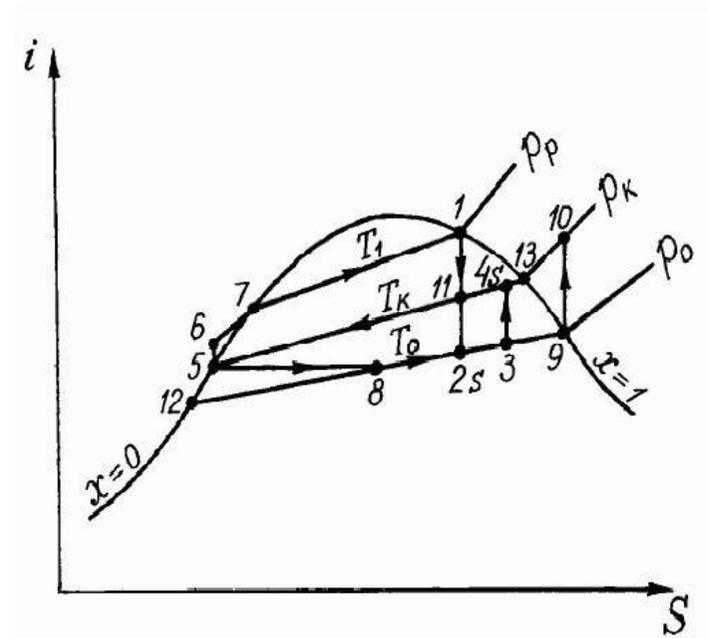


Рис. 1.2. Теоретический цикл парэжекторной холодильной машины:
 а – совмещенный цикл на $S-T$ -диаграмме; б – совмещенный цикл на $S-i$ -диаграмме

В машине совершаются два цикла. Если условно представить сжатие в эжекторе отдельно рабочего пара (процессе $2s - 11$) и холодного пара (процесс $9 - 10$), то прямой цикл будет изображаться процессами $1 - 11 - 5 - 6 - 7 - 1$, а обратный – процессами $9 - 10 - 5 - 8 - 9$. В сопле потенциальная энергия давления преобразуется в кинетическую – процесс $1 - 2s$; энергия прямого цикла передается обратному в камере смешения – процесс $2s - 3 - 9$; работа в обратном цикле затрачивается в диффузоне – процесс $3 - 4s$. Процессы расширения $11 - 2s$ от давления p_k до давления p_0 с последующим сжатием смешанного пара (процесс $3 - 4s$) от давления p_0 до p_k , по существу, выполняются для передачи работы прямого цикла обратному.

Таким образом, в машине осуществляются два цикла: круговой процесс $1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 1$ является прямым циклом, а круговой процесс $9 - 3 - 4 - 5 - 8 - 9$ – обратным (холодильным) циклом.

2.3. Методика расчета теоретического цикла парэжекторной холодильной машины

Исходные данные:

Холодопроизводительность..... Q_0 , кВт
 Температура кипения воды в испарителе..... t_0 , °С
 Температура кипения воды в парогенераторе..... $t_p = t_h$, °С
 Температура конденсации воды в генераторе..... t_k , °С

Таблица 2.1

Параметры узловых точек цикла

Параметры	Точки					
	1	$2s$	3	$4s$	5	6
p , кПа						
t , °С						
i , кДж/кг						

Параметры	Точки				
	7	8	9	10	11
p , кПа					
t , °С					
i , кДж/кг					

Методика расчета

Кратность циркуляции

$$a_T = \frac{i_{10} - i_9}{(i_1 - i_{11}) - (i_6 - i_5)}$$

Удельная массовая производительность, кДж/кг

$$q_0 = i_9 - i_8$$

Массовый поток холодного пара, кг/с

$$G_{x.p} = \frac{Q_0}{q_0}$$

Массовый поток рабочего пара, кг/с

$$G_{p.p} = a G_{x.p}$$

Энтальпия пара на входе в диффузор, кДж/кг

$$i_3 = \frac{G_{p.p} \cdot i_{2s} + G_{x.p} \cdot i_9}{G_{p.p} + G_{x.p}}$$

Тепловой поток в парогенераторе, кВт

$$Q_{\Gamma} = G_{\text{р.п}} (i_1 - i_6)$$

Тепловой поток в конденсаторе, кВт

$$Q_{\text{к}} = (G_{\text{р.п}} + G_{\text{х.п}}) (i_{4s} - i_5)$$

Тепловой баланс машины:

теплота подведенная, кВт, *

$$Q_0 + Q_{\Gamma} + Q_{\text{н}}$$

* Теплота, подводимая к хладагенту в насосе при его сжатии, не соизмеримо мала по сравнению с тепловыми потоками через аппараты, поэтому принимаем $Q_{\text{н}} = 0$.

теплота отведенная, кВт

$$Q_{\text{к}}$$

Тепловой коэффициент

$$\zeta_{\text{т}} = \frac{Q_0}{Q_{\Gamma}}$$

3. АБСОРБЦИОННЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

3.1. 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 разделяются 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 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.

3.2. 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.

3.3. 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 направлением движения раствора и пара через ступени генераторов низкого и высокого давлений. Их целесообразно

применять при температуре греющего источника, превышающей на $(50 - 60)^\circ\text{C}$ 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.

3.4. 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 используется высокотемпературная теплота. Это, в основном, парожетторные машины и абсорбционные машины [2].

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 изменяется 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.

3.5. 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 представлен на рис. 3.1. В качестве теоретического цикла АБПНТ принят цикл при следующих условиях (рис. 3.1, 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 окружающей среды $t_{o,c}$; температура кипения воды в испарителе t_0 равна температуре охлажденного источника t_s ; состояние пара, поступающего из генератора АБХМ в конденсатор, определяется при средней концентрации ξ_{cp} и давлении раствора при его кипении p_h .

В испарителе I (рис. 3, 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.

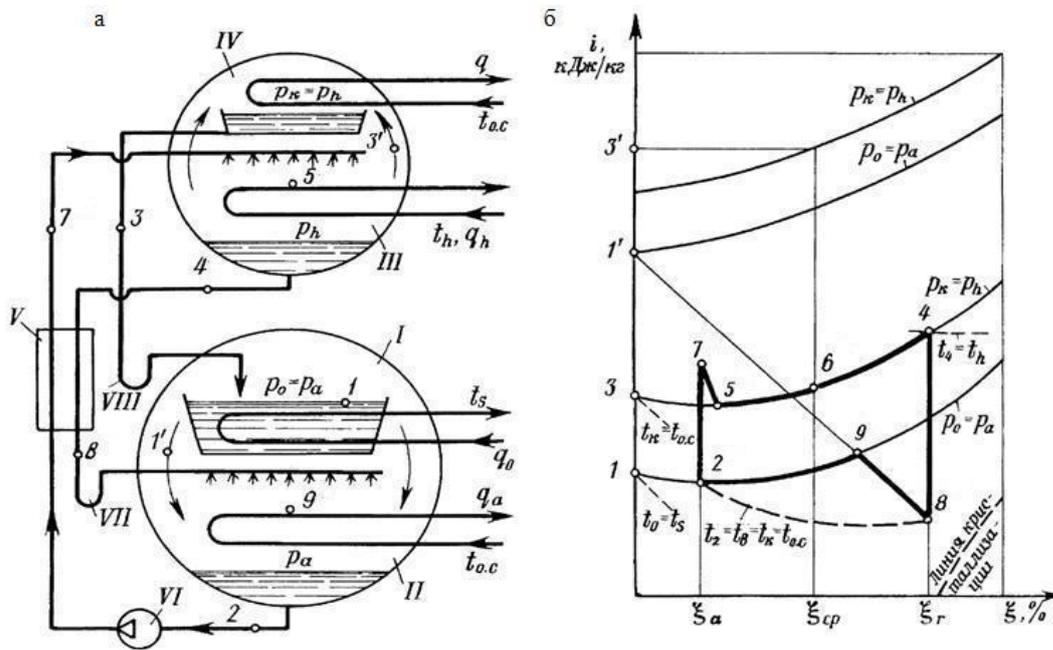


Рис. 3.1. Абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина с одноступенчатой генерацией пара рабочего вещества и совмещенным теплопереносом в генераторе и абсорбере:

а – схема машины; б – процессы на $\xi - i$ - 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

Теплота, выделяющаяся в процессе абсорбции, отводится к источнику окружающей среды 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.

Основные процессы цикла (рис. 3.1, б) следующие: 2 – 7 – нагрев слабого раствора в теплообменнике растворов; 7 – 5 – адиабатно-изобарная десорбция пара рабочего вещества; 5 – 4 – кипение рас-

творя 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 $\xi - i$ – диаграмме (рис. 3.1, б) для водного раствора бромистого лития по заданным температурам внешних источников теплоты и после определения основных параметров цикла АБХМ.

3.6. Методика расчета теоретического цикла абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины

Исходные данные:

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

Таблица 3.1

Параметры узловых точек цикла

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

Параметры	Точки			
	5	7	8	9
p , кПа				
t , °С				
i , кДж/кг				
ξ , %				

Методика расчета

Температура раствора на выходе из генератора, °С

$$t_4 = t_h.$$

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

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

Теоретическая концентрация слабого раствора, %

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

Энтальпия слабого раствора на выходе из абсорбера, кДж/кг

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

Теоретическая концентрация крепкого раствора, %

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

Зона дегазации, %

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

Энтальпия раствора на выходе из генератора, кДж/кг

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

Кратность циркуляции раствора

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

Температура крепкого раствора на выходе из теплообменника,
%

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

Энтальпия крепкого раствора 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

$$t_5 = f(p_h, t_7 \text{ УГОЛ НАКЛОНА ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ В } i - \xi \text{ - ДИАГРАММЕ})$$

Средняя концентрация раствора в генераторе, %

$$\xi_{\text{ср}} = \frac{\xi_a + \xi_r}{2}.$$

Энтальпия пара на выходе из генератора, кДж/кг

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

Температура начала процесса абсорбции, °С

$$t_9 = f(p_a, i_8, \text{ УГОЛ НАКЛОНА ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ В } i - \xi \text{ - ДИАГРАММЕ})$$

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 АБПНТ, кДж/кг

$$q_{\text{под}} = q_h + q_0.$$

Теплота, отведенная от АБПНТ, кДж/кг

$$q_{\text{отв}} = q_k + q_a.$$

Коэффициент трансформации

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

4. ТЕПЛОВОЙ И КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Путём теплового расчёта основных аппаратов определяется площадь их теплообменной поверхности.

При конструктивном расчёте определяют число теплообменных труб, рабочую длину и число ходов аппаратов.

4.1. Тепловой расчёт основных аппаратов

В результате теплового расчёта аппаратов определяется площадь их теплопередающей поверхности с предварительным вычислением коэффициента теплопередачи или плотности теплового тока [1].

Основными исходными данными для расчёта являются: тепловой поток, температура веществ, участвующих в процессе теплообмена (раствора, рабочего вещества, внешнего источника теплоты).

Кроме того, необходим ещё ряд параметров, таких как, геометрические размеры элементов теплопередающей поверхности, теплофизические свойства веществ, скорость и степень изменения температуры внешнего источника теплоты (если это жидкость) и др.

По принципу действия и конструкции наиболее широко распространены следующие типы аппаратов [1].

Для бромистолитиевых АТТ.

Генераторы – горизонтальный трубный затопленного типа, горизонтальный трубный плёночный;

Абсорбер – горизонтальный трубный плёночный;

Конденсатор – горизонтальный трубный;

Испаритель – горизонтальный трубный плёночный;

Теплообменник растворов – горизонтальный трубный.

4.1.1. Коэффициент теплоотдачи со стороны внешних источников теплоты

При выборе расчётных зависимостей для определения коэффициентов теплоотдачи со стороны внешних источников теплоты следует учитывать фазовое состояние источника и происходящий с ним физический процесс: охлаждение дымовых газов, с конденсаци-

ей из них водяных паров в горизонтальных трубах, конденсацию водяного пара внутри труб (генераторы) и на наружной поверхности труб (конденсаторы), охлаждение теплоносителя (испарители) или нагрев воды внутри труб (абсорберы, конденсаторы, дефлегматоры).

Расчётные зависимости для указанных процессов приведены в литературе [1].

4.1.2. Коэффициент теплоотдачи со стороны раствора α_p

При абсорбции

Коэффициент теплоотдачи при плёночной абсорбции раствором бромида лития на наружной поверхности горизонтальных гладких труб рассчитывается по формуле

$$\alpha_p = \frac{\text{Nu}_T \lambda}{\delta} \quad (4.1)$$

где $\text{Nu}_T = 1,03 \left(\text{Re}_T \frac{\delta}{L} \right)^{0,46}$ – число Нуссельта; $\text{Re}_T = \text{Re}_T \text{Pr}_T$ – число Пекле;

$\text{Re}_T = \frac{\Gamma}{\mu_p}$ – число Рейнольдса; $\text{Pr}_T = \frac{\nu_p}{a_p}$ – число Прандтля;

$\delta = \left(\frac{3 \nu_p \Gamma}{2 g \rho_p} \right)^{\frac{1}{3}}$ – толщина плёнки раствора; $L = \frac{\pi d_H}{2}$ – длина плёнки

раствора; ν_p – кинематический коэффициент вязкости раствора; g – ускорение свободного падения; a – коэффициент температуропроводности; Γ – плотность орошения с учётом одностороннего омывания трубы; $\Gamma = (0,04 \div 0,055)$ кг/(м·с).

При кипении раствора

Коэффициент теплоотдачи при кипении бромистолитиевого раствора в большом объёме:

При кипении чистой жидкости и растворов в [3] предложена функциональная зависимость при известном коэффициенте теплоотдачи растворителя α_B :

$$\tilde{\alpha} = \frac{\alpha_p}{\alpha_B} = f(\tilde{\lambda}, \tilde{\rho}, \tilde{c}_p, \tilde{\mu}, \tilde{r}, \dots), \quad (4.2)$$

где α_p – коэффициент теплоотдачи при кипении раствора; $\tilde{\lambda} = \frac{\lambda_p}{\lambda_B}$ – относительная теплопроводность; $\tilde{\rho} = \frac{\rho_p}{\rho_B}$ – относительная плотность; $\tilde{c}_p = \frac{c_{pp}}{c_{pB}}$ – относительная теплоемкость; $\tilde{\mu} = \frac{\mu_p}{\mu_B}$ – относительная динамическая вязкость; $\tilde{r} = \frac{r_p}{r_B}$ – относительная теплота парообразования; р, в – индексы, соответствующие раствору и воде.

Коэффициент теплоотдачи при кипении чистых жидкостей:

$$\alpha_B = C\lambda^{1/3} g^{-1/6} \left(\frac{\rho' - \rho''}{\sigma} \right)^{1/2} \left(\frac{c_p p q}{r \rho} \right)^{2/3} \quad (4.3)$$

где C – постоянный коэффициент; λ – теплопроводность; g – ускорение свободного падения; ρ', ρ'' – плотность соответственно жидкости и пара; σ – поверхностное натяжение; c_p – теплоемкость; $r = h'' - h'$ – теплота парообразования (h', h'' – энтальпия раствора и пара соответственно), тогда:

$$\tilde{\alpha} = \tilde{c}_p^{2/3} \tilde{\lambda}^{1/3} \tilde{r}^{-2/3} \tilde{\sigma}^{-1/2} \tilde{\rho}^{1/2}. \quad (4.4)$$

4.1.3. При кипении и конденсации рабочего вещества

Расчёт коэффициента теплоотдачи к плёнке воды, кипящей в вакууме на наружной поверхности горизонтальных труб, производится по формуле (4.1), где число Нуссельта определяется по обобщенным зависимостям, полученным в [4]:

для воды

$$\text{Nu}_T = 0,522 \left(\text{Pe}_T \frac{\delta}{L} \right)^{0,26} \quad (4.5)$$

для раствора (4,6 – 7,8 по соли LiBr)

$$\text{Nu}_T = 0,399 \left(\text{Pe}_T \frac{\delta}{L} \right)^{0,26} \quad (4.6)$$

При кипении воды в затопленном испарителе абсорбционного повышающего термотрансформатора, коэффициент теплоотдачи определяется по формуле, предложенной в [5]:

$$\tilde{\alpha}_3 = 2,42 (P_0 q)^{0,33} \quad (4.7)$$

где P_0 – давление кипения, [Па]; q – плотность теплового потока, [Вт/м²].

Расчёт коэффициента теплоотдачи при конденсации воды в горизонтальном трубном конденсаторе осуществляется по известной зависимости [1].

4.1.4. При теплообмене без изменения агрегатного состояния

Коэффициент теплоотдачи со стороны раствора, протекающего в трубах, определяется по зависимости, описывающей теплоотдачу при вынужденном движении среды в прямых трубах и каналах [1].

Коэффициент теплоотдачи со стороны раствора, протекающего в межтрубном пространстве, вычисляется по зависимости, описывающей теплоотдачу при поперечном обтекании средой гладких труб [1].

4.2. Конструктивный расчёт основных аппаратов

Путём конструктивного расчёта определяются следующие параметры:

Общая длина труб

$$L_0 = \frac{F}{\pi d}, \quad (4.8)$$

где F – площадь расчётной поверхности теплообмена; d – диаметр трубы расчётной поверхности.

Общее число труб n определяется по формуле

$$n = n_1 z \quad (4.9)$$

где z – число ходов в аппарате; n_1 – число труб в одном ходе аппарата по движению среды внутри труб (определяется в тепловом расчёте, если среда – жидкость; принимается $n = n_1$, т.е. $z = 1$, если среда – конденсирующийся пар).

Длина труб (рабочая длина аппарата) l задается и сравнивается с аналогичными машинами по холодопроизводительности.

Осуществляется предварительная компоновка поперечного разреза аппарата или блока аппаратов при принятом значении l , z , n с целью определения диаметра или периметра, описывающего трубную решётку. При этом следует учитывать рекомендуемое отношение рабочей длины аппарата к его диаметру или к поперечным размерам блока аппаратов, а также равенство длины аппаратов в блоке. При неравенстве длины (l) аппаратов, конструируемых в одном блоке, выбирается значение l , вычисленное для одного из аппаратов. Для других аппаратов, с учётом этого, рассчитываются n_1 , скорость среды в трубах и корректируется тепловой расчёт.

Проверка принятой в тепловом расчёте плотности орошения осуществляется:

– для горизонтальных плёночных аппаратов по формуле

$$\Gamma = \frac{G}{l n_{\text{в}}}, \quad (4.10)$$

где G – массовый поток орошающей среды; $n_{\text{в}}$ – число труб в верхнем ряду пучка.

При несовпадении значения Γ корректируется n_v или n , соответственно.

В горизонтальных трубных теплообменниках растворов определяется число перегородок в межтрубном пространстве m

$$m = \frac{l}{l_1} - 1. \quad (4.11)$$

Здесь l_1 – расстояние между перегородками, определяемое (при варьировании числа труб в поперечном сечении по движению раствора) из совместного решения уравнений

$$d_{\text{экв}} = \frac{4F}{S}; \quad (4.12)$$

$$F = \frac{G_r}{\rho_p \omega_p}, \quad (4.13)$$

где $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр (принят в тепловом расчёте); F – площадь поперечного сечения по ходу раствора; S – смоченный периметр; G_r – массовый поток раствора; ρ_p – плотность раствора; ω_p – скорость раствора (принята в тепловом расчёте).

5. УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДНОГО РАСТВОРА БРОМИСТОГО ЛИТИЯ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ [6]

5.1. Удельная теплоемкость

Определение удельной теплоемкости раствора производится по выражению

$$c_p = 3,6371 - 0,029\xi + 1,4285714 \cdot 10^{-5}(65t + 30\xi - t\xi) \quad (5.1)$$

Формула (4.6) рекомендуется для расчетов при условиях

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

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.

5.2. Плотность

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

$$\rho(t, \bar{m}) = 1049 + 53,54m - 0,718m^2 - t(0,584 + 0,0146m) - \frac{5,7 \cdot 10^8}{(t + 273,15)^3}, \quad (5.2)$$

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

Относительная погрешность расчета по зависимости (5.2) в наименее благоприятном случае при $\xi = 65\%$ и $t = 170^\circ\text{C}$ составляет 0,4 – 0,5%.

5.3. Теплопроводность

Для расчета теплопроводности λ рекомендуются следующие зависимости:

При $t \leq 80^\circ\text{C}$

$$\lambda = -3,5552933 + 3,407759 \cdot 10^{-2} T - 9,381419 \cdot 10^{-5} T^2 + 8,834924 \cdot 10^{-8} T^3 + A(\xi) \quad (5.3)$$

где $A(\xi)$ определяется выражением:

$$A(\xi) = 0,4923607 \xi - 0,422476 \cdot 10^{-2} T \xi + 5,658527 \cdot 10^{-6} T^2 \xi - 0,1522615 \xi^2 - 1,730562 \cdot 10^{-4} T \xi^2 + 1,895136 \xi^3 \quad (5.4)$$

При $t \leq 80^\circ\text{C}$

$$\lambda = -8,8574733 + 6,973969 \cdot 10^{-6} T - 1,694229 \cdot 10^{-4} T^2 + 8,834924 \cdot 10^{-8} T^3 + A(\xi). \quad (5.5)$$

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%.

5.4. 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

$$\mu = \left[1,8793 - 0,025765 \xi - 0,035t + 0,004 \xi t + \frac{-169,263 + 6,989 \xi}{t + 223,95 - 3,63 \xi} \right] \cdot 10^{-3}; \quad (5.6)$$

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

$$\mu = \left[-0,5707 + 0,009235 \xi + \frac{-169,263 + 6,989 \xi}{t + 223,95 - 3,63 \xi} \right] \cdot 10^{-3}. \quad (5.7)$$

Расхождение зависимостей (3.11) и (3.12) при экстраполяции до 140–150°С составляет 10%, а при экстраполяции до 170–180°С находится в пределах 15–20%.

5.5. Поверхностное натяжение

Поверхностное натяжение σ определяется по аппроксимационному уравнению, (Н/м):

$$\sigma = \frac{A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + A_4 T^3 + A_5 \xi + A_6 T \xi + A_7 T^2 \xi}{100} + \frac{A_8 \xi^2 + A_9 T \xi^2 + A_{10} \xi^3}{100}. \quad (5.8)$$

Значения постоянных коэффициентов выражения (5.8) приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Значения постоянных коэффициентов выражения (5.8)

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

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТА

6.1. Физические принципы получения холода

Условия совмещения прямого и обратного циклов с целью получения холода, используя теплоту высокого потенциала. Типы теплоиспользующих машин.

Литература [1]: стр. 163 – 164.

6.2. Пароэжекторные холодильные машины (ПЭХМ)

Преимущества и недостатки ПЭХМ по сравнению с другими типами холодильных машин. Особенности работы ПЭХМ с барометрическим конденсатором. Особенности работы эжекторов в схеме парокомпрессорной холодильной машине. Система воздухоудаления в пароводяной эжекторной холодильной машине. Оценка энергетической эффективности ПЭХМ.

Литература [1]: стр. 164 – 183.

6.3. Абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ)

Преимущества и недостатки абсорбционных холодильных машин (АХМ) по сравнению с другими типами холодильных машин. Внешние источники, необходимые для осуществления термодинамического цикла АХМ. Внутренняя регенерация теплоты в цикле и ее влияние на энергетическую эффективность АХМ. Влияние параметров внешних сред на выбор схемы АХМ.

Область применения АБХМ. Виды греющей среды для АБХМ. Особенности осуществления отдельных процессов теплообмена в основных аппаратах. Особенности конструкции абсорберов АБХМ.

Литература [1]: стр. 183 – 226, 814 – 816,

6.4. Абсорбционные водоаммиачные холодильные машины (АВХМ)

Область применения. Промышленные абсорбционные и бытовые абсорбционно-диффузионные водоаммиачные холодильные машины. Преимущества и недостатки АВХМ по сравнению с другими типами АХМ. Особенности работы безнасосной АВХМ. Особенности конструкций основных растворных аппаратов АВХМ.

Литература [1]: стр. 226 – 258, 814 – 823.

Методические указания

При изучении парожеторных холоильных машин обратить внимание на принцип действия ее, термодинамические процессы отдельных элементов и энергетическую эффективность в целом. Сопоставить теоретические и действительные процессы с помощью термодинамической диаграммы.

Проанализировать потери в жеторе и обосновать низкое значение КПД жетора. Ознакомиться с основными рабочими схемами парожеторных машин и конструкциями отдельных ее элементов.

При изучении абсорбционных холоильных машин необходимо в первую очередь усвоить схему простейшей абсорбционной холоильной машины и уметь изобразить происходящие в ней процессы в диаграмме концентрация- энтальпия.

Изучить методику составления материальных и тепловых балансов аппаратов и машин в целом.

При изучении абсорбционных бромистолитиевых холоильных машин обратить внимание на особенности, связанные с применением в этих машинах воды в качестве рабочего вещества и водного раствора бромистого лития как абсорбента.

При изучении абсорбционных водоаммиачных холоильных машин проанализировать возможные схемы ректифицирующих устройств, оценить их энергетическую эффективность и методику расчета.

При анализе работы абсорбционной холоильной машины особенно обратить внимание на выбор схемы в зависимости от параметров внешних сред и способы повышения энергетической эффек-

тивности машины путем улучшения внутренней регенерации теплоты в цикле.

Вопросы для самопроверки

1. Изобразить простейшую схему пароэжекторной холодильной машины и ее процессы в диаграмме энтропия– энтальпия.

2. Перечислить источники необратимых потерь в эжекторе.

3. Составить тепловой баланс пароэжекторной машины и определить коэффициент, которым оценивается энергетическая эффективность машины.

4. Обосновать области применения абсорбционных бромистолитиевых и водоаммиачных холодильных машин.

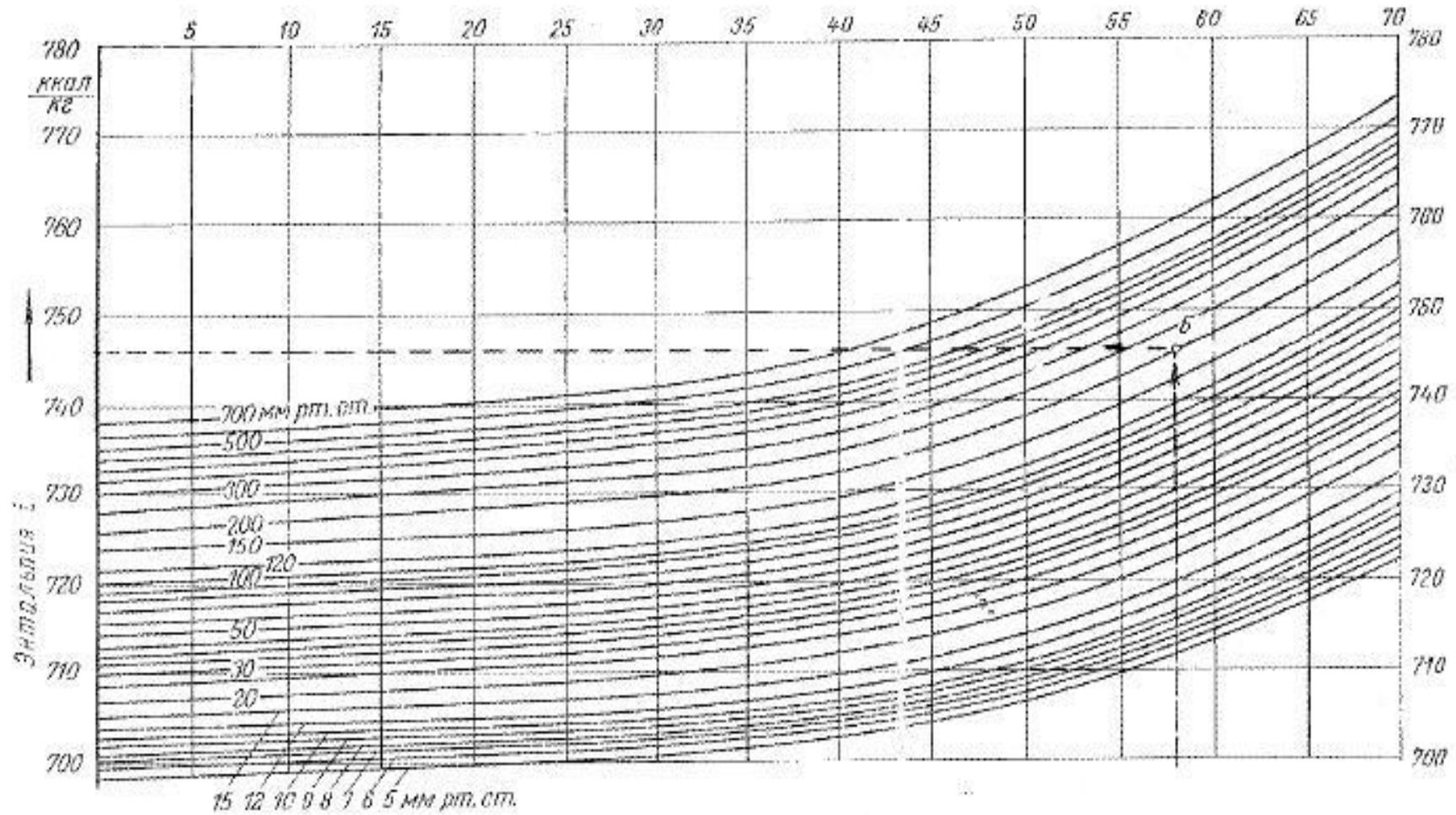
5. Изобразить схемы одноступенчатых бромистолитиевой и водоаммиачной абсорбционных холодильных машин, изобразить в соответствующих термодинамических диаграммах процессы и циклы.

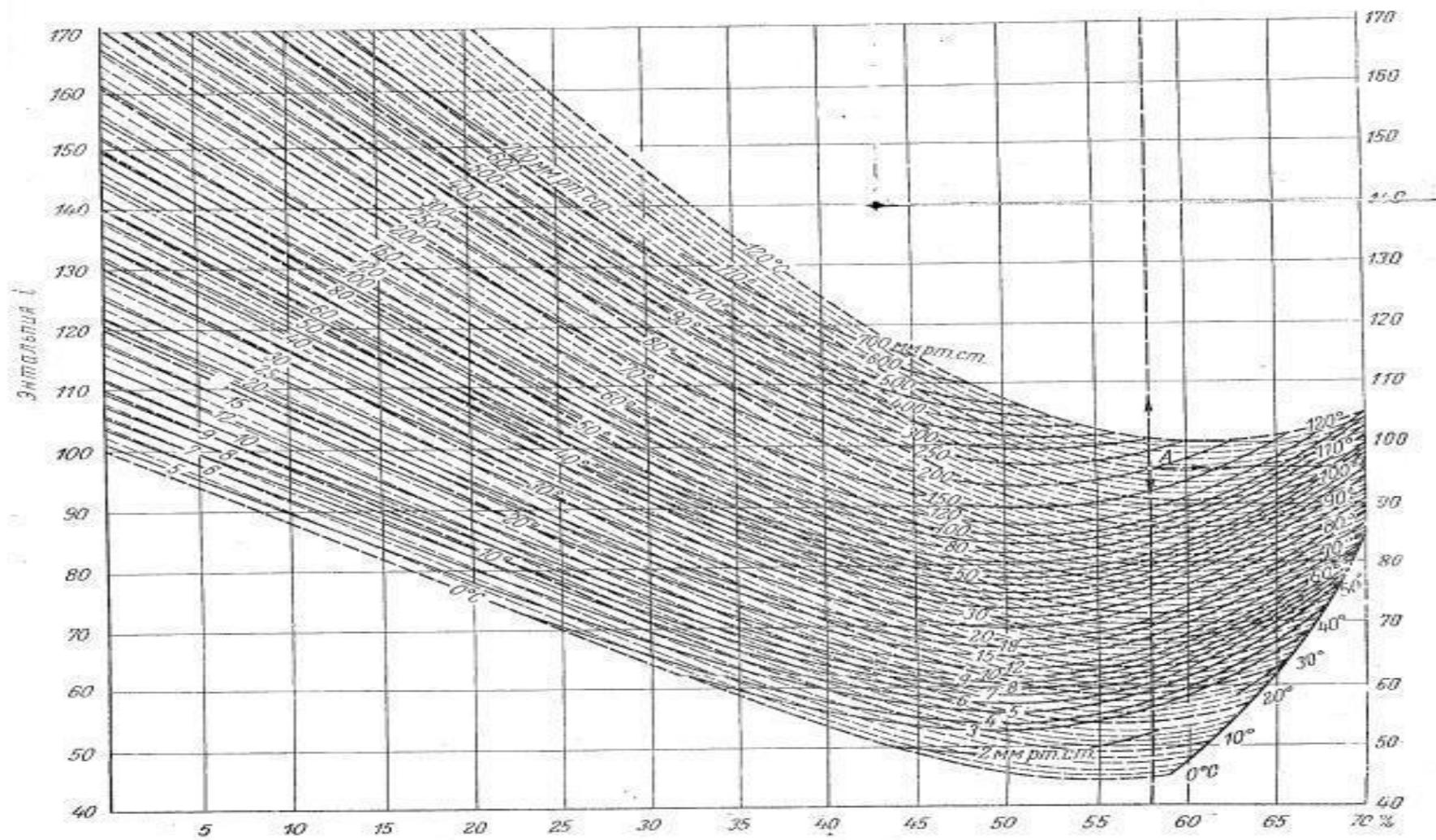
6. Особенности действительных процессов в абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины.

7. Составить тепловой баланс аппаратов и машин в целом определить коэффициент, которым оценивается энергетическая эффективность АХМ.

ПРИЛОЖЕНИЯ

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





Давление пара водного раствора бромистого лития [7]

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	99,325	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	96,658	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	93,192	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	88,926	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	83,460	118,26	164,12	223,85
30	0,4453	0,8986	1,6932	3,1331	5,4529	9,1592	14,839	23,331	35,464	52,662	76,527	108,39	150,79	206,65
35	0,3853	0,7773	1,4932	2,7198	4,7463	7,9993	12,986	20,398	31,197	46,529	67,728	96,258	134,12	183,98
40	0,3120	0,6333	1,2132	2,2265	3,9200	6,6128	10,799	17,065	26,264	39,197	57,328	81,726	114,39	158,65
45	0,2293	0,4693	0,9066	1,6798	2,9731	5,0662	8,3326	13,279	20,532	31,064	45,596	65,594	92,392	130,66
50	0,1466	0,3040	0,5933	1,1199	2,0132	3,4797	5,8262	9,4259	14,799	22,665	33,597	48,662	69,061	94,659
55	0,0773	0,1663	0,3360	0,6533	1,1999	2,1332	3,6397	6,0262	9,2659	14,332	21,731	31,997	46,663	66,661
60	–	0,0813	0,1733	0,3600	0,6933	1,2532	2,1332	3,5864	5,7995	9,1992	14,132	21,332	31,197	45,063
65	–	–	–	0,2000	0,3933	0,7266	1,2932	2,1998	3,6664	5,7328	8,799	13,332	19,732	28,531
70	–	–	–	–	–	–	–	1,2599	2,1065	3,4397	5,399	8,266	12,132	17,465

Энтальпия водного раствора бромистого лития [7]

ξ , %	Значение h , кДж/кг в зависимости от t , °С													
	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

Плотность водного раствора бромистого лития [7]

ξ , %	Значение плотности ρ' , кг/м ³ , в зависимости от t , °С										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	999,8	999,7	998,2	995,7	992,2	988,0	983,2	977,8	971,8	965,3	958,4
5	1036	1036	1034	1032	1028	1024	1015	1007	998	988	977
10	1075	1074	1072	1069	1065	1060	1054	1046	1036	1025	1012
15	1118	1116	1113	1110	1106	1101	1096	1090	1082	1074	1065
20	1164	1162	1159	1155	1151	1146	1141	1135	1129	1123	1116
25	1215	1212	1208	1204	1198	1193	1188	1183	1178	1172	1166
30	1267	1263	1259	1255	1250	1245	1240	1234	1228	1222	1216
35	1326	1322	1317	1312	1307	1302	1297	1292	1287	1282	1276
40	1391	1386	1381	1376	1371	1366	1361	1356	1351	1346	1341
45	1463	1458	1452	1446	1440	1435	1430	1425	1420	1415	1409
50	1544	1539	1533	1527	1521	1515	1509	1503	1497	1491	1485
55	1632	1627	1622	1616	1610	1603	1596	1590	1584	1578	1571
60	–	1725	1719	1712	1706	1699	1692	1986	1679	1672	1665
65	–	–	–	–	1810	1803	1795	1787	1779	1772	1764
70	–	–	–	–	–	–	–	–	1926	1915	1904

Изобарная теплоемкость водного раствора бромистого лития [7]

ξ , %	Значение c_p , кДж/(кг·К), при t , °С										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	4,216	4,191	4,183	4,178	4,178	4,183	4,187	4,191	4,195	4,204	4,216
5	3,936	3,940	3,944	3,948	3,958	3,961	3,965	3,969	3,977	3,986	3,994
10	3,663	3,688	3,705	3,714	3,718	3,726	3,735	3,739	3,743	3,751	3,760
15	3,400	3,450	3,483	3,492	3,496	3,504	3,508	3,525	3,534	3,542	3,546
20	3,140	3,203	3,249	3,266	3,278	3,291	3,295	3,303	3,312	3,320	3,324
25	2,885	2,964	3,023	3,048	3,065	3,073	3,081	3,090	3,098	3,102	3,107
30	2,646	2,734	2,805	2,834	2,859	2,872	2,885	2,893	2,897	2,901	2,901
35	2,424	2,533	2,600	2,633	2,659	2,671	2,684	2,692	2,696	2,700	2,700
40	2,219	2,315	2,403	2,453	2,474	2,495	2,504	2,516	2,520	2,525	2,520
45	2,026	2,131	2,232	2,278	2,311	2,332	2,349	2,357	2,366	2,370	2,366
50	1,842	1,959	2,081	2,135	2,173	2,194	2,211	2,219	2,223	2,223	2,219
55	1,687	1,809	1,951	2,010	2,047	2,068	2,085	2,098	2,106	2,110	2,110
60	–	–	1,842	1,901	1,938	1,959	1,980	1,993	2,001	2,010	2,018

Теплопроводность водного раствора бромистого лития [7]

$\xi, \%$	Значение λ , Вт/(м·К) при $t, ^\circ\text{C}$								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
0	0,552	0,578	0,598	0,614	0,628	0,641	0,651	0,661	0,669
5	0,541	0,565	0,585	0,601	0,614	0,627	0,637	0,647	0,655
10	0,528	0,552	0,571	0,587	0,600	0,613	0,622	0,632	0,640
15	0,514	0,537	0,556	0,571	0,584	0,597	0,606	0,614	0,623
20	0,499	0,522	0,541	0,555	0,568	0,579	0,588	0,597	0,605
25	0,484	0,506	0,524	0,538	0,550	0,562	0,571	0,579	0,586
30	0,468	0,490	0,506	0,520	0,531	0,543	0,551	0,559	0,566
35	0,452	0,473	0,490	0,502	0,514	0,524	0,534	0,541	0,548
40	0,437	0,457	0,473	0,486	0,498	0,507	0,516	0,523	0,529
45	0,423	0,442	0,457	0,470	0,481	0,491	0,499	0,506	0,512
50	0,409	0,428	0,442	0,455	0,465	0,474	0,481	0,488	0,495
55	0,393	0,412	0,426	0,437	0,448	0,457	0,464	0,470	0,477
60	—	—	0,408	0,419	0,428	0,437	0,444	0,450	0,456

Динамическая вязкость водного раствора бромистого лития [7]

ξ , %	Значение $\mu \cdot 10^3$, Па·с, при t , °С										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	1,789	1,308	1,003	0,798	0,652	0,546	0,466	0,404	0,355	0,315	0,283
5	1,844	1,388	1,086	0,877	0,720	0,609	0,528	0,463	0,419	0,376	0,342
10	1,936	1,482	1,179	0,962	0,794	0,679	0,600	0,534	0,477	0,436	0,394
15	2,069	1,585	1,269	1,044	0,863	0,738	0,646	0,578	0,520	0,473	0,442
20	2,213	1,708	1,379	1,132	0,944	0,802	0,707	0,636	0,576	0,528	0,480
25	2,406	1,841	1,511	1,240	1,030	0,871	0,772	0,687	0,625	0,575	0,525
30	2,674	2,060	1,687	1,339	1,163	0,984	0,855	0,765	0,700	0,636	0,584
35	3,011	2,341	1,911	1,588	1,308	1,120	0,986	0,873	0,799	0,718	0,664
40	3,492	2,745	2,211	1,831	1,536	1,318	1,158	1,031	0,926	0,842	0,771
45	4,391	3,456	2,731	2,271	1,901	1,636	1,430	1,268	1,151	1,033	0,930
50	5,807	4,567	3,635	2,979	2,495	2,122	1,841	1,624	1,445	1,298	1,173
55	8,408	6,429	5,191	4,283	3,543	2,999	2,587	2,243	1,981	1,799	1,651
60	–	–	8,478	6,628	5,410	4,537	3,859	3,322	2,906	2,608	2,415
65	–	–	–	–	–	7,410	6,067	5,075	4,323	3,757	3,299

Кинематическая вязкость водного раствора бромистого лития [7]

ξ , %	Значение $\nu \cdot 10^6$, м ² /с, при t , °С										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	1,77	1,30	1,00	0,80	0,66	0,55	0,47	0,41	0,365	0,325	0,295
5	1,78	1,34	1,05	0,85	0,70	0,595	0,52	0,46	0,42	0,38	0,35
10	1,80	1,38	1,10	0,90	0,745	0,64	0,57	0,51	0,46	0,425	0,39
15	1,85	1,42	1,14	0,94	0,78	0,67	0,59	0,53	0,48	0,44	0,415
20	1,90	1,47	1,19	0,98	0,82	0,70	0,62	0,56	0,51	0,47	0,43
25	1,98	1,52	1,25	1,03	0,86	0,73	0,65	0,58	0,53	0,49	0,45
30	2,11	1,63	1,34	1,11	0,93	0,79	0,69	0,62	0,57	0,52	0,48
35	2,27	1,77	1,45	1,21	1,00	0,86	0,76	0,68	0,62	0,56	0,52
40	2,51	1,98	1,60	1,33	1,12	0,965	0,85	0,76	0,685	0,625	0,575
45	3,00	2,37	1,88	1,57	1,32	1,14	0,995	0,89	0,81	0,73	0,66
50	3,76	2,96	2,37	1,95	1,64	1,40	1,22	1,08	0,965	0,87	0,79
55	5,15	3,95	3,20	2,65	2,20	1,87	1,62	1,41	1,25	1,14	1,05
60	–	–	4,93	3,87	3,17	2,67	2,28	1,97	1,73	1,56	1,45
65	–	–	–	–	–	4,11	3,38	2,84	2,43	2,12	1,87

Поверхностное натяжение водного раствора бромистого лития [7]

ξ , %	Значение $\sigma \cdot 10^2$, Н/м, при t , °С										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	7,66	7,45	7,26	7,07	6,92	6,71	6,58	6,42	6,26	6,11	5,95
5	7,70	7,51	7,34	7,18	7,01	6,86	6,73	6,59	6,48	6,36	6,23
10	7,76	7,60	7,43	7,29	7,13	7,00	6,88	6,77	6,66	6,56	6,45
15	7,85	7,69	7,53	7,39	7,24	7,12	6,99	5,89	6,79	6,69	6,62
20	7,93	7,79	7,65	7,51	7,37	7,24	7,14	7,04	6,94	6,87	6,76
25	8,04	7,90	7,77	7,63	7,50	7,36	7,26	7,16	7,07	7,00	6,91
30	8,18	8,04	7,91	7,75	7,65	7,52	7,41	7,31	7,24	7,15	7,07
35	8,32	8,17	8,05	7,93	7,79	7,68	7,58	7,49	7,41	7,32	7,25
40	8,46	8,29	8,20	8,08	8,02	7,87	7,77	7,68	7,60	7,52	7,44
45	8,65	8,52	8,39	8,28	8,17	8,07	7,98	7,88	7,82	7,75	7,65
50	8,86	8,74	6,61	8,51	8,40	8,30	8,21	8,14	8,05	7,98	7,91
55	9,10	8,97	8,87	8,78	8,67	8,57	8,49	8,40	8,33	8,26	8,19
60	—	—	9,17	9,05	8,95	8,86	8,78	8,69	8,62	8,55	8,51

**Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения
(по температурам) [7]**

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
0,01	283,16	0,6112	1,0002	206,175	0,000614	2501,0	2501,0	0,0000	9,1562	9,1562
1,0	274,15	0,6566	1,0001	192,611	4,17	2502,8	2498,6	0,0152	9,1298	9,1146
2,0	275,15	0,7054	1,0001	179,935	8,39	2504,7	2496,3	0,0306	9,1035	9,0729
3,0	276,15	0,7575	1,0000	168,165	12,60	2506,5	2493,9	0,0459	9,0773	9,0314
4,0	277,15	0,8129	1,0000	157,267	16,80	2508,3	2491,5	0,0611	9,0514	8,9903
5,0	278,15	0,8718	1,0000	147,167	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0258	8,9496
6,0	279,15	0,9346	1,0000	137,768	25,21	2512,0	2486,8	0,0913	9,0003	8,9090
7,0	280,15	1,0012	1,0001	129,061	29,41	2513,9	2484,5	0,1063	8,9751	8,8688
8,0	281,15	1,0721	1,0001	120,952	33,60	2515,7	2482,1	0,1213	8,9501	8,8288

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'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
9,0	282,15	1,1473	1,0002	113,423	37,80	2517,5	2479,7	0,1362	8,9254	8,7892
10,0	283,15	1,2271	1,0003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009	8,7499
11,0	284,15	1,3118	1,0003	99,896	46,19	2521,2	2475,0	0,1658	8,8766	8,7108
12,0	285,15	1,4015	1,0004	93,828	50,38	2523,0	2472,6	0,1805	8,8525	8,6720
13,0	286,15	1,4967	1,0006	88,165	54,57	2524,9	2470,2	0,1952	8,8286	8,6334
14,0	287,15	1,5974	1,0007	82,893	58,75	2526,7	2467,9	0,2098	8,8050	8,5952
15,0	288,15	1,7041	1,0008	77,970	62,94	2528,6	2465,7	0,2243	8,7815	8,5572
15,5	288,65	1,7598	1,0009	75,632	65,03	2529,5	2464,5	0,2316	8,7699	8,5383
16,0	289,15	1,8170	1,0010	73,376	67,13	2530,4	2463,3	0,2388	8,7583	8,5195
16,5	289,65	1,8759	1,0011	71,194	69,22	2531,3	2462,1	0,2460	8,7468	8,5008
17,0	290,15	1,9364	1,0012	69,087	71,31	2532,2	2460,9	0,2533	8,7353	8,4820
17,5	290,65	1,9986	1,0012	67,051	73,40	2533,1	2459,7	0,2605	8,7239	8,4634

Продолжение прил. 10

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'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
18,0	291,15	2,0626	1,0013	65,080	75,50	2534,0	2458,5	0,2677	8,7125	8,4448
18,5	291,65	2,1284	1,0014	63,175	77,59	2535,0	2457,4	0,2748	8,7011	8,4263
19,0	292,15	2,1960	1,0015	61,334	79,68	2535,9	2456,2	0,2820	8,6898	8,4078
19,5	292,65	2,2654	1,0016	59,556	81,77	2536,8	2455,0	0,2892	8,6786	8,3894
20,0	293,15	2,3368	1,0017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674	8,3711
20,5	293,65	2,4102	1,0018	56,166	85,95	2538,6	2452,6	0,3034	8,6563	8,3529
21,0	294,15	2,4855	1,0019	54,556	88,04	2539,5	2451,5	0,3105	8,6452	8,3347
21,5	294,65	2,5629	1,0020	52,997	90,13	2540,4	2450,3	0,3176	8,6342	8,3166
22,0	295,15	2,6424	1,0022	51,488	92,22	2541,4	2449,2	0,3247	8,6232	8,2985
22,5	295,65	2,7241	1,0023	50,027	94,32	2542,3	2448,0	0,3318	8,6123	8,2805
23,0	296,15	2,8079	1,0024	48,615	96,41	2543,2	2446,8	0,3389	8,6014	8,2625
23,5	296,65	2,8940	1,0025	47,247	98,50	2544,1	2445,6	0,3459	8,5905	8,2446

Продолжение прил. 10

$t,$ °C	$T,$ К	$p,$ кПа	$v',$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$v'',$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$h',$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$h'',$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$r,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$s',$ $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'',$ $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$ $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
24,0	297,15	2,9824	1,0026	45,923	100,59	2545,0	2444,4	0,3530	8,5797	8,2267
24,5	297,65	3,0731	1,0028	44,641	102,68	2545,9	2443,2	0,3600	8,5690	8,2090
25,0	298,15	3,1663	1,0029	43,399	104,77	2546,8	2442,0	0,3670	8,5583	8,1913
25,5	298,65	3,2619	1,0030	42,196	106,86	2547,7	2440,8	0,3740	8,5476	8,1736
26,0	299,15	3,3600	1,0032	41,031	108,95	2548,6	2439,6	0,3810	8,5370	8,1560
26,5	299,65	3,4606	1,0033	39,904	111,64	2549,5	2438,5	0,3880	8,5264	8,1384
27,0	300,15	3,5639	1,0034	38,811	113,13	2550,4	2437,3	0,3949	8,5159	8,1210
27,5	300,65	3,6698	1,0036	37,752	115,22	2551,4	2436,2	0,4019	8,5054	8,1035
28,0	301,15	3,7785	1,0037	36,726	117,31	2552,3	2435,0	0,4088	8,4950	8,0862
28,5	301,65	3,8900	1,0039	35,732	119,40	2553,2	2433,8	0,4158	8,4846	8,0688
29,0	302,15	4,0043	1,0040	34,768	121,48	2554,1	2432,6	0,4227	8,4743	8,0516
29,5	302,65	4,1215	1,0042	33,834	123,57	2555,0	2431,4	0,4296	8,4640	8,0344

Продолжение прил. 10

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'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
30,0	303,15	4,2417	1,0043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537	8,0172
30,5	303,65	4,3650	1,0045	32,050	127,75	2556,8	2429,0	0,4434	8,4435	8,0001
31,0	304,15	4,4913	1,0046	31,199	129,84	2557,7	2427,9	0,4503	8,4334	7,9831
31,5	304,65	4,6208	1,0048	30,373	131,93	2558,6	2426,7	0,4571	8,4233	7,9662
32,0	305,15	4,7536	1,0049	29,572	134,02	2559,5	2425,5	0,4640	8,4132	7,9492
32,5	305,65	4,8896	1,0051	28,796	136,11	2560,4	2424,3	0,4708	8,4031	7,9323
33,0	306,15	5,0290	1,0053	28,042	138,20	2561,4	2423,2	0,4777	8,3932	7,9155
33,5	306,65	5,1718	1,0054	27,312	140,29	2562,3	2422,0	0,4845	8,3832	7,8987
34,0	307,15	5,3182	1,0056	26,602	142,38	2563,2	2420,8	0,4913	8,3733	7,8820
34,5	307,65	5,4681	1,0058	25,914	144,47	2564,1	2419,6	0,4981	8,3634	7,8653
35,0	308,15	5,6217	1,0060	25,246	146,56	2565,0	2418,4	0,5049	8,3536	7,8487
36,0	309,15	5,9401	1,0063	23,968	150,74	2566,8	2416,1	0,5184	8,3341	7,8157

Продолжение прил. 10

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'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
37,0	310,15	6,2740	1,0067	22,764	154,92	2568,6	2413,7	0,5319	8,3147	7,7828
38,0	311,15	6,6240	1,0070	21,629	159,09	2570,4	2411,3	0,5453	8,2955	7,7502
39,0	312,15	6,9907	1,0074	20,558	163,27	2572,2	2408,9	0,5588	8,2765	7,7177
40	313,15	7,3749	1,0078	19,548	167,45	2574,0	2406,5	0,5721	8,2576	7,6855
41	314,15	7,7772	1,0082	18,594	171,63	2575,8	2404,2	0,5854	8,2389	7,6535
42	315,15	8,1983	1,0086	17,694	175,81	2577,6	2401,8	0,5987	8,2203	7,6216
43	316,15	8,6390	1,0090	16,843	179,99	2579,4	2399,4	0,6120	8,2019	7,5899
44	317,15	9,0998	1,0094	16,039	184,17	2581,1	2396,9	0,6252	8,1836	7,5584
45	318,15	9,5817	1,0099	15,278	188,35	2582,9	2394,5	0,6383	8,1655	7,5272
46	319,15	10,0854	1,0103	14,559	192,53	2584,7	2392,2	0,6514	8,1475	7,4961
47	320,15	10,612	1,0107	13,879	196,71	2586,5	2389,8	0,6645	8,1297	7,4652
48	321,15	11,161	1,0112	13,236	200,89	2588,3	2387,4	0,6776	8,1121	7,4345

Продолжение прил. 10

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'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
49	322,15	11,735	1,0116	12,626	205,07	2590,1	2385,0	0,6906	8,0945	7,4039
50	323,15	12,335	1,0121	12,048	209,26	2591,8	2382,5	0,7035	8,0771	7,3736
51	324,15	12,960	1,0126	11,501	213,44	2593,6	2380,2	0,7164	8,0598	7,3434
52	325,15	13,612	1,0131	10,982	217,62	2595,4	2377,8	0,7293	8,0427	7,3133
53	326,15	14,292	1,0136	10,490	221,80	2597,2	2375,4	0,7422	8,0258	7,2836
54	327,15	15,001	1,0140	10,024	225,98	2598,9	2372,9	0,7550	8,0089	7,2539
55	328,15	15,740	1,0145	9,5812	230,17	2600,7	2370,5	0,7677	7,9922	7,2245
56	329,15	16,510	1,0150	9,1609	234,35	2602,4	2368,1	0,7804	7,9756	7,1952
57	330,15	17,312	1,0156	8,7618	238,54	2604,2	2365,7	0,7931	7,9591	7,1660
58	331,15	18,146	1,0161	8,3831	242,72	2606,0	2363,3	0,8058	7,9428	7,1370
59	332,15	19,015	1,0166	8,0229	246,91	2607,7	2360,8	0,8184	7,9266	7,1082
60	333,15	19,919	1,0171	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106	7,0796

Продолжение прил. 10

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'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
61	334,15	20,859	1,0177	7,3554	255,28	2611,2	2355,9	0,8435	7,8946	7,0511
62	335,15	21,837	1,0182	7,0458	259,46	2613,0	2353,5	0,8560	7,8788	7,0228
63	336,15	22,854	1,0188	6,7512	263,65	2614,7	2351,1	0,8685	7,8631	6,9946
64	337,15	23,910	1,0193	6,4711	267,84	2616,4	2348,6	0,8809	7,8475	6,9666
65	338,15	25,008	1,0199	6,2042	272,02	2618,2	2346,2	0,8933	7,8320	6,9387
66	339,15	26,148	1,0205	5,9502	276,21	2619,9	2343,7	0,9057	7,8167	6,9110
67	340,15	27,332	1,0211	5,7082	280,40	2621,6	2341,2	0,9180	7,8015	6,8835
68	341,15	28,561	1,0217	5,4775	284,59	2623,3	2338,7	0,9303	7,7864	6,8561
69	342,15	29,837	1,0222	5,2576	288,78	2625,1	2336,3	0,9426	7,7714	6,8288
70	343,15	31,161	1,0228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565	6,8017
71	344,15	32,533	1,0235	4,8481	297,16	2628,5	2331,3	0,9670	7,7417	6,7747
72	345,15	33,957	1,0241	4,6574	301,36	2630,2	2328,8	0,9792	7,7270	6,7478

Продолжение прил. 10

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'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
73	346,15	35,433	1,0247	4,4753	305,55	2631,9	2326,3	0,9913	7,7125	6,7212
74	347,15	36,963	1,0253	4,3015	309,74	2633,6	2323,9	1,0034	7,6980	6,6946
75	348,15	38,548	1,0259	4,1356	313,94	2635,3	2321,4	1,0154	7,6837	6,6683
76	349,15	40,190	1,0266	3,9771	318,13	2637,0	2318,9	1,0275	7,6694	6,6419
77	350,15	41,890	1,0272	3,8257	322,33	2638,7	2316,4	1,0395	7,6553	6,6158
78	351,15	43,650	1,0279	3,6811	326,52	2640,4	2313,9	1,0514	7,6413	6,5899
79	352,15	45,473	1,0235	3,5427	330,72	2642,1	2311,4	1,0634	7,6274	6,5640
80	353,15	47,359	1,0292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135	6,5383
81	354,15	49,310	1,0299	3,2839	339,11	2645,4	2306,3	1,0871	7,5998	6,5127
82	355,15	51,328	1,0305	3,1629	343,31	2647,1	2303,8	1,0990	7,5862	6,4872
83	356,15	53,415	1,0312	3,0471	347,51	2648,8	2301,3	1,1108	7,5726	6,4618
84	357,15	55,572	1,0319	2,9362	351,71	2650,4	2298,7	1,1225	7,5592	6,4367

Продолжение прил. 10

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'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
85	358,15	57,803	1,0326	2,8300	355,92	2652,1	2296,2	1,1343	7,5459	6,4116
86	359,15	60,107	1,0333	2,7284	360,12	2653,7	2293,6	1,1460	7,5326	6,3866
87	360,15	62,488	1,0340	2,6309	364,32	2655,4	2291,1	1,1577	7,5195	6,3618
88	361,15	64,947	1,0347	2,5376	368,53	2657,0	2288,5	1,1693	7,5064	6,3371
89	362,15	67,486	1,0354	2,4482	372,73	2658,7	2286,0	1,1809	7,4934	6,3125
90	363,15	70,108	1,0361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805	6,2880
91	364,15	72,814	1,0369	2,2801	381,15	2661,9	2280,7	1,2041	7,4677	6,2636
92	365,15	75,607	1,0376	2,2012	385,36	2663,5	2278,1	1,2156	7,4550	6,2394
93	366,15	78,488	1,0384	2,1256	389,57	2665,2	2275,6	1,2271	7,4424	6,2153
94	367,15	81,460	1,0391	2,0529	393,78	2666,8	2273,0	1,2386	7,4299	6,1913
95	368,15	84,525	1,0398	1,9832	397,99	2668,4	2270,4	1,2500	7,4174	6,1674
96	369,15	87,685	1,0406	1,9163	402,20	2670,0	2267,8	1,2615	7,4051	6,1436

Окончание прил. 10

t , °C	T , K	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'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
97	370,15	90,943	1,0414	1,8520	406,42	2671,6	2265,2	1,2729	7,3928	6,1199
98	371,15	94,301	1,0421	1,7902	410,63	2673,2	2262,6	1,2842	7,3806	6,0964
99	372,15	97,760	1,0429	1,7309	414,85	2674,8	2259,9	1,2956	7,3685	6,0729
100	373,15	101,325	1,0437	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564	6,0495

Термодинамические свойства воды и перегретого пара [7]

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$p = 1 \text{ кПа}$			$p = 2 \text{ кПа}$			$p = 3 \text{ кПа}$			$p = 4 \text{ кПа}$						
	$t_s = 6,982^\circ\text{C}$			$t_s = 17,511^\circ\text{C}$			$t_s = 24,098^\circ\text{C}$			$t_s = 28,981^\circ\text{C}$						
	$v' = 0,0010001;$		$v'' = 129,208;$		$v' = 0,0010012;$		$v'' = 67,006;$		$v' = 0,0010027;$		$v'' = 45,668;$		$v' = 0,0010040;$		$v'' = 34,803;$	
	$h' = 29,33;$		$h'' = 2513,8;$		$h' = 73,45;$		$h'' = 2533,2;$		$h' = 101,00;$		$h'' = 2545,2;$		$h' = 121,41;$		$h'' = 2554,1;$	
	$s' = 0,1060;$		$s'' = 8,9756$		$s' = 0,2606;$		$s'' = 8,7236$		$s' = 0,3543;$		$s'' = 8,5776$		$s' = 0,4224;$		$s'' = 8,4747$	
	$v,$	$h,$	$s,$	$v,$	$h,$	$s,$										
$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$														
0	0,0010002	0	0,0001	0,0010002	0	-0,0001	0,0010002	0	-0,0001	0,0010002	0	-0,0001				
10	130,60	2519,5	8,9956	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510				
20	135,23	2538,1	9,0604	67,58	2537,8	8,7396	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963				
30	139,85	2556,8	9,1230	69,90	2556,5	8,8032	46,58	2556,3	8,6145	34,92	2556,0	8,4810				
40	144,47	2575,5	9,1837	72,21	2575,3	8,8632	48,13	2575,0	8,6755	36,08	2574,8	8,5421				
50	149,09	2594,2	9,2426	74,53	2594,0	8,9222	49,67	2593,8	8,7345	37,24	2593,6	8,6012				

Продолжение прил. 11

$t, ^\circ\text{C}$	$p = 5 \text{ кПа}$			$p = 6 \text{ кПа}$			$p = 7 \text{ кПа}$			$p = 8 \text{ кПа}$		
	$t_s = 32,90^\circ\text{C}$			$t_s = 36,18^\circ\text{C}$			$t_s = 39,02^\circ\text{C}$			$t_s = 41,53^\circ\text{C}$		
	$v' = 0,0010052;$		$v'' = 28,196;$	$v' = 0,0010064;$		$v'' = 23,742;$	$v' = 0,0010074;$		$v'' = 20,532;$	$v' = 0,0010084;$		$v'' = 18,106;$
	$h' = 137,77;$		$h'' = 2561,2;$	$h' = 151,50;$		$h'' = 2567,1;$	$h' = 163,38;$		$h'' = 2572,2;$	$h' = 173,87;$		$h'' = 2576,7;$
	$s' = 0,4762;$		$s'' = 8,3952$	$s' = 0,5209;$		$s'' = 8,3305$	$s' = 0,5591;$		$s'' = 8,2760$	$s' = 0,5926;$		$s'' = 8,2289$
	$v,$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$h,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$s,$ $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$									
0	0,0010002	0	-0,0001	0,0010002	0	-0,0001	0,0010002	0	-0,0001	0,0010002	0	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	28,86	2574,6	8,4385	24,04	2574,3	8,3537	20,60	2574,1	8,2819	0,0010078	167,4	0,5721
50	29,78	2593,4	8,4977	24,81	2593,2	8,4130	21,26	2593,0	8,3414	18,60	2592,8	8,2792

Продолжение прил. 11

$t, ^\circ\text{C}$	$p = 9 \text{ кПа}$			$p = 10 \text{ кПа}$			$p = 12 \text{ кПа}$			$p = 14 \text{ кПа}$		
	$t_s = 43,79^\circ\text{C}$			$t_s = 45,83^\circ\text{C}$			$t_s = 49,45^\circ\text{C}$			$t_s = 52,58^\circ\text{C}$		
	$v' = 0,0010094;$		$v'' = 16,206;$	$v' = 0,0010102;$		$v'' = 14,676;$	$v' = 0,0010119;$		$v'' = 12,364;$	$v' = 0,0010133;$		$v'' = 10,696;$
	$h' = 183,28;$		$h'' = 2580,8;$	$h' = 191,84;$		$h'' = 2584,4;$	$h' = 251,46;$		$h'' = 2590,9;$	$h' = 220,03;$		$h'' = 2596,4;$
	$s' = 0,6224;$		$s'' = 8,1875$	$s' = 0,6493;$		$s'' = 8,1505$	$s' = 0,6963;$		$s'' = 8,0867$	$s' = 0,7367;$		$s'' = 8,0330$
	$v,$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$h,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$s,$ $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$									
0	0,0010002	0	-0,0001	0,0010002	0	-0,0001	0,0010002	0	-0,0001	0,0010002	0	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	0,0010078	167,4	0,5721	0,0010078	167,4	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721
50	16,53	2592,6	8,2243	14,87	2592,3	8,1752	12,385	2591,9	8,0900	0,0010121	209,3	0,7035

$t, ^\circ\text{C}$	$p = 16 \text{ кПа}$			$p = 18 \text{ кПа}$			$p = 20 \text{ кПа}$			$p = 22 \text{ кПа}$		
	$t_s = 55,34^\circ\text{C}$			$t_s = 57,83^\circ\text{C}$			$t_s = 60,09^\circ\text{C}$			$t_s = 62,16^\circ\text{C}$		
	$v' = 0,0010147;$		$v'' = 9,4348;$	$v' = 0,0010160;$		$v'' = 8,4470;$	$v' = 0,0010172;$		$v'' = 7,6515;$	$v' = 0,0010183;$		$v'' = 6,9967;$
	$h' = 231,60;$		$h'' = 2601,3;$	$h' = 242,00;$		$h'' = 2605,7;$	$h' = 206,94;$		$h'' = 2609,6;$	$h' = 260,14;$		$h'' = 2596,4;$
	$s' = 0,7721;$		$s'' = 7,9865$	$s' = 0,8036;$		$s'' = 7,9456$	$s' = 0,8321;$		$s'' = 7,9092$	$s' = 0,7367;$		$s'' = 8,0330$
	$v,$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$h,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$s,$ $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$									
0	0,0010002	0	-0,0001	0,0010002	0	-0,0001	0,0010002	0	-0,0001	0,0010002	0	-0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721
50	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035

Теплофизические свойства воды на линии насыщения [7]

t , °C	$p \cdot 10^5$, Па	ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
0	1,013	999,9	0	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	-0,63	765,4	13,5
10	1,013	999,7	42,04	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	0,70	741,6	9,45
20	1,013	998,2	83,91	4,183	0,507	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,03
30	1,013	995,7	125,7	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	3,21	712,2	5,45
40	1,013	992,2	167,5	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	3,87	696,5	4,36
50	1,013	988,1	209,3	4,174	0,640	15,5	549,4	0,556	4,49	676,9	3,53
60	1,013	983,1	251,1	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	5,11	662,2	3,08
70	1,013	977,8	293,0	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	5,70	643,5	2,52
80	1,013	971,8	335,0	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	6,32	625,9	2,23
90	1,013	965,3	377,0	4,208	0,676	16,5	314,9	0,326	6,95	607,2	1,97
100	1,013	958,4	419,1	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	0,685	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	0,686	17,1	237,1	0,252	8,64	548,4	1,47

Продолжение прил. 12

t , °C	$p \cdot 10^5$, Па	ρ' , кг/м ³	h' , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
130	2,70	934,8	546,4	4,266	0,686	17,3	217,8	0,233	9,19	528,8	1,35
140	3,61	926,1	589,1	4,287	0,685	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	0,684	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,246	0,681	17,8	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,2	719,3	4,380	0,676	17,2	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	0,672	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,03
190	12,55	876,0	807,8	4,459	0,664	17,2	144,2	0,165	12,6	400,2	0,965
200	15,55	863,0	852,5	4,505	0,658	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,932
210	19,08	852,8	897,7	4,555	0,649	16,7	130,5	0,153	14,1	354,1	0,915
220	23,20	840,3	943,7	4,614	0,640	16,5	124,6	0,148	14,8	331,6	0,898
230	27,98	827,3	990,2	4,681	0,629	16,3	119,7	0,145	15,9	310,0	0,888
240	33,48	813,6	1037,5	4,76	0,617	16,0	114,8	0,141	16,8	285,5	0,883
250	39,78	799,0	1085,7	4,87	0,605	15,5	109,0	0,137	18,1	261,9	0,884

Окончание прил. 12

t , °C	$p \cdot 10^5$, Па	ρ' , кг/м ³	h' , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
260	46,94	784,0	1135,7	4,98	0,593	15,2	105,9	0,135	19,7	237,4	0,892
270	55,05	767,9	1185,3	5,12	0,578	14,7	102,0	0,133	21,6	214,8	0,905
280	64,19	750,7	1236,8	5,30	0,565	14,3	98,1	0,131	23,7	191,3	0,917
290	74,45	732,3	1290,0	5,50	0,548	13,7	94,2	0,129	26,2	168,7	0,944
300	85,92	712,5	1344,9	5,76	0,532	13,0	91,2	0,128	29,2	144,2	0,986
310	98,70	691,1	1402,3	6,11	0,514	12,2	88,3	0,128	32,9	120,7	1,05
320	112,90	667,1	1462,1	6,57	0,494	11,3	85,3	0,128	38,2	98,10	1,14
330	128,65	640,2	1526,2	7,25	0,471	10,2	81,4	0,127	43,3	76,71	1,25
340	146,08	610,1	1594,8	8,20	0,446	8,95	77,5	0,127	53,4	56,70	1,42
350	165,37	574,4	1671,4	10,10	0,431	7,90	72,6	0,126	66,8	38,16	1,70
360	186,74	528,0	1761,5	14,65	0,367	4,2	66,7	0,126	109	20,21	2,66
370	210,53	450,5	1892,5	40,32	0,338	1,85	56,9	0,126	264	4,709	6,80

Теплофизические свойства водяного пара на линии насыщения [7]

t , °C	$p \cdot 10^5$, Па	ρ'' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	0,0061	0,00485	2501,0	2501,0	1,86	1,61	1790	8,75	1805	1,02
10	0,0123	0,00940	2519,4	2477,4	1,86	1,69	968	9,15	973,7	1,00
20	0,0234	0,0173	2537,7	2453,8	1,86	1,76	548	9,50	549,4	1,00
30	0,0424	0,0304	2555,9	2430,2	1,87	1,84	268	9,80	266,7	1,00
40	0,0737	0,0512	2574,0	2406,5	1,88	1,93	201	10,30	201,4	1,00
50	0,1234	0,0830	2591,8	2382,5	1,91	2,01	127	10,75	129,4	1,02
60	0,1992	0,130	2609,5	2358,4	1,93	2,10	83,5	11,20	86,0	1,03
70	0,3116	0,198	2626,8	2333,8	1,96	2,20	56,8	11,65	58,8	1,04
80	0,4736	0,293	2643,8	2308,9	1,98	2,30	39,6	11,85	41,1	1,04
90	0,7011	0,423	2660,3	2283,4	2,02	2,35	27,4	11,90	29,4	1,07
100	1,013	0,597	2676,3	2257,2	2,14	2,37	18,58	12,27	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,18	2,49	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,21	2,59	10,50	12,85	11,46	1,09

Продолжение прил. 13

t , °C	$p \cdot 10^5$, Па	ρ'' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,26	2,69	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2754,1	2145,0	2,32	2,79	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,40	2,88	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,48	3,01	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,58	3,13	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,71	3,27	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	2,86	3,42	1,872	15,00	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,02	3,55	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,20	3,72	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,41	3,90	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,63	4,09	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,0	1766	3,88	4,29	0,658	17,75	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801	1716	4,16	4,52	0,544	18,24	0,913	1,68

Продолжение прил. 13

t , °C	$p \cdot 10^5$, Па	ρ'' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
260	46,94	23,72	2796	1661	4,47	4,80	0,453	18,83	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2790	1604	4,82	5,12	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2780	1543	5,23	5,49	0,317	19,91	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766	1476	5,69	5,83	0,261	20,59	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749	1404	6,28	6,27	0,216	21,28	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727	1325	7,12	6,84	0,176	21,97	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700	1238	8,21	7,51	0,141	22,85	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2666	1140	9,88	8,26	0,108	23,93	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2622	1027	12,35	9,30	0,0811	25,20	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564	893	16,24	10,70	0,0581	26,58	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481	720	23,03	12,79	0,0386	29,13	0,202	5,23
370	210,00	203,0	2331	438	56,52	17,10	0,0150	33,73	0,166	11,10

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холодильные машины: Учеб. / Под ред. Л. С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 2006. – 944 с.
2. **Дзино А.А., Малинина О.С.** Системы прямых и обратных термодинамических циклов для получения тепла и холода // VII Междунар. научно-техн. конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Ч. I: Материалы конференции. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – С. 141–144.
3. **Дорохов А.Р., Бочагов В.Н.** Кипение водных растворов бромистого лития в большом объеме // Холодильная техника. 1980. № 6. С. 18–20.
4. **Дзино А.А., Васильева В.А.** Эффективность процесса кипения водного раствора бромистого лития низкой концентрации в испарителе АБХМ. – В трудах XII научно-техн. конференции ЛТИХП. – М.: Указ. ВИНТИ «Депонированные рукописи». 1983. № 2. С. 13–18.
5. **Дзино А.А.** Экспериментальное исследование процессов кипения воды в испарителе затопленного типа под вакуумом. – В кн.: Повышение эффективности холодильных машин: Сб. науч. тр. / Под ред. И.И. Орехова. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1983. – С. 20–26.
6. 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.
7. **Богданов С.Н., Бурцев С.И., Иванов О.П., Куприянова А.В.** Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ./ Под ред. С.Н. Богданова. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГАХПТ, 1999. – 320 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ.....	3
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	33
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	68

Дзино Анатолий Аполлонович
Малинина Ольга Сергеевна

ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Т.В. Белянкина

Компьютерная верстка
И.В. Гришко

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

*Печатается
в авторской редакции*

Подписано в печать 24.12.2015. Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. 4,19. Печ. л. 4,5. Уч.-изд. л. 4,25

Тираж 50 экз. Заказ № С 105

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

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