

«Термодинамика снизу иногда выглядит даже интереснее, чем сверху».

М.П. ВУКАЛОВИЧ

УДК 621.11:621.57

Перспективы использования низких температур окружающей среды в теплоэнергетике и холодильной технике



Д-р техн. наук, проф.
В.М. БРОДЯНСКИЙ
МЭИ

The potentials of use of low ambient temperatures, typical of the winter period in Russia, in the heat-and-power engineering and refrigeration engineering have been considered in the article. It is known from thermodynamics that in Carnot direct cycle a decrease in the temperature of heat receiver is advantageous from the energy point of view, while in Carnot refrigeration cycle – a decrease in the condensing temperature is beneficial. In practice this can be rather easily implemented in refrigeration technique by supplying cold outside air to condensers of refrigerating installation. In steam power cycles a decrease in temperature level is associated with the necessity to change the traditional working substance – water. In this case use of Kalina water-ammonia cycle has good prospects. The problems associated with the transition to air condensers can be fully overcome.

Использование низких температур окружающей среды (природного холода) в зимнее время, в частности для охлаждения пищевых и биопродуктов, – одно из традиционных направлений холодильной техники. В последнее время появилась информация о новых возможностях использования природного холода как в холодильной технике, так и в области, традиционно связанной с высокими температурами, – теплоэнергетике. Редакция обратилась к члену редколлегии журнала д-ру техн. наук, проф. В.М. Бродянскому с просьбой осветить эту проблему на страницах нашего журнала.

Низкие температуры окружающей среды зимой характерны как для ряда северных стран, так и для большей части территории России.

В целом это обстоятельство негативно сказывается на экономике, и в частности на энергетике этих стран.

Холодильная техника, как крупный потребитель электроэнергии, тоже «висит» на энергетике и зимой. Отдельные случаи полезного применения низ-

ких температур окружающей среды в этой отрасли, к сожалению, не меняют общей ситуации.

В то же время мнения о характере, масштабе и следствиях влияния низких температур на экономику существенно различаются, простираясь от крайне негативно-пессимистических до умеренно оптимистических.

Сторонники первого направления – пессимисты – обращают основное внимание на трудности в энергетике, сельском хозяйстве, транспорте, строительстве, а также в быту, обусловленные низкими температурами окружающей среды в зимнее время. Ссылаясь на это, некоторые авторы приходят даже к далеко идущим пессимистическим взглядам на будущее нашей страны и ее место в мировой экономике [4].

Что касается оптимистов, не разделяющих столь скептических взглядов на «дальнейшие виды России», то они, не отрицая трудностей, которые создаст климат на большей части тер-

ритории нашей страны, считают, что они могут быть в значительной степени преодолены путем проведения соответствующей хозяйственной политики в сочетании с использованием современных научных достижений. В общем плане это, по-видимому, верно, но переход к реальным делам требует конкретного анализа.

В этой связи полезно, абстрагируясь от глобальных политико-экономических прогнозов, которые редко сбываются, рассмотреть с позиций энергетики некоторые реальные возможности применения низких температур окружающей среды в народном хозяйстве.

Для этого необходимо, хотя бы кратко, рассмотреть, если можно так выразиться, некоторые положительные свойства отрицательных температур [2].

Эти свойства используются, например, в технологиях хранения, транспортировки и холодильной обработки пищевых и

Однако существует и другой значительный резерв повышения энергетической эффективности, основанный на применении низких температур окружающей среды в холодное время года в теплоэнергетике — ключевой отрасли народного хозяйства.

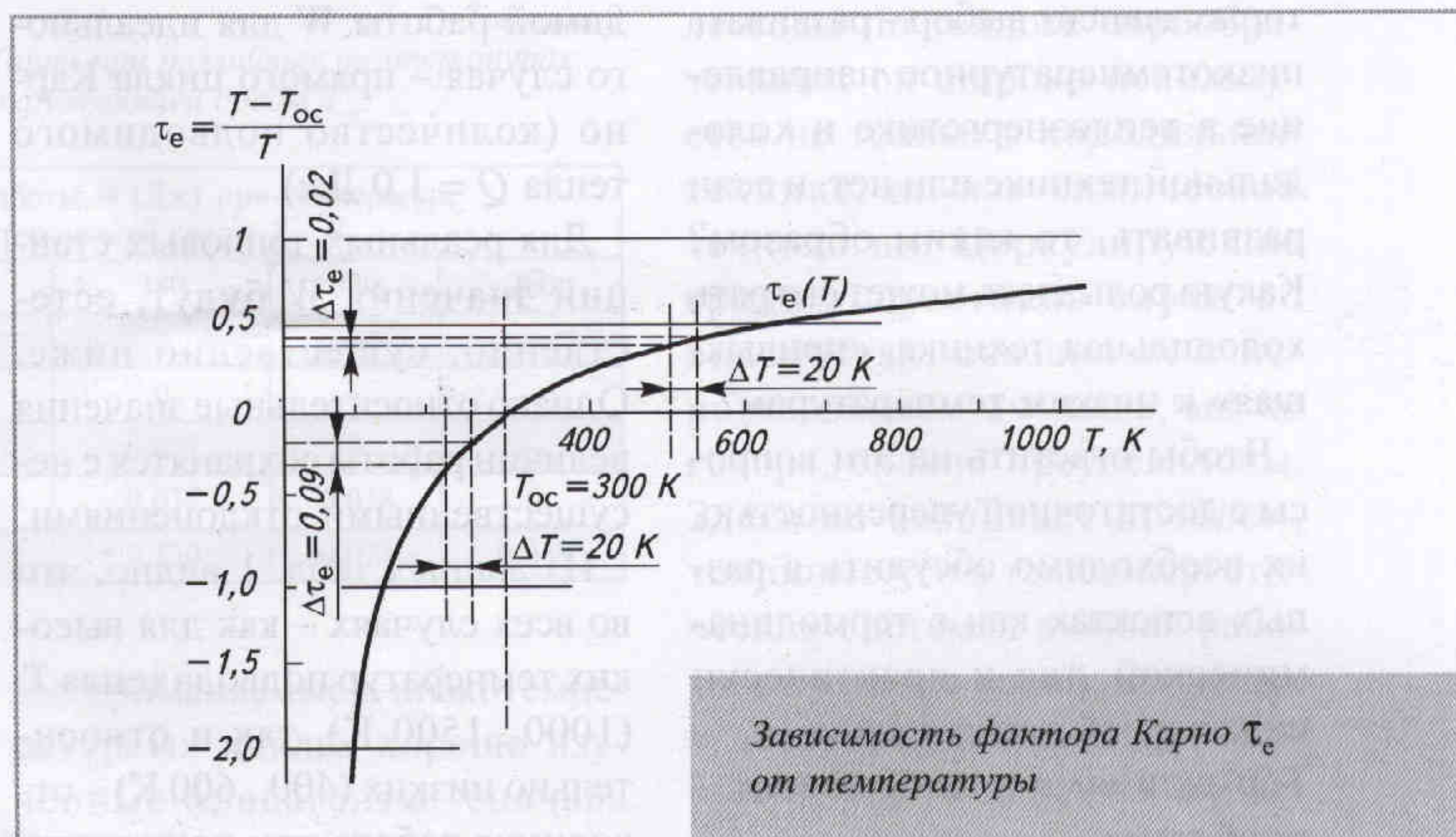
Теплоэнергетика и холод

Идея нового, «холодного», направления в развитии теплоэнергетики связана непосредственно с использованием научного задела и опыта, накопленного как энергетикой, так и холодильной техникой.

До последнего времени основным препятствием в сближении низкотемпературной техники с теплоэнергетикой было традиционное применение воды в качестве единственно возможного рабочего тела на электростанциях. Достоинства воды как в термодинамическом, так и экономическом плане хорошо известны.

Попытки использовать в теплоэнергетике другие рабочие тела (речь, естественно, идет о паротурбинных электростанциях, а не о двигателях внутреннего сгорания или газотурбинных установках), например некоторые из применяемых в холодильной технике, рассматривались до последнего времени большинством специалистов как экзотика, хотя изредка и обсуждались в литературе [3, 6].

Увеличение термического КПД паросилового цикла может быть достигнуто, как известно из термодинамики, при прочих равных условиях только двумя



путями. Первый из них – это повышение температурного уровня подвода тепла как в самом паровом цикле, так и посредством «надстроек» – от МГД (магнитогазодинамических генераторов) до газовых турбин. Газотурбинный вариант оказался практически наиболее приемлемым и позволил поднять термический КПД станций до 60 %.

Однако дальше двигаться «вверх» становится все труднее и дороже, тем более что по незыблемым законам термодинамики каждый градус повышения температуры дает все меньший энергетический эффект. Это наглядно показывает диаграмма в координатах $\tau_e = (T - T_{oc})/T$ (эксергетическая температура) – T [2] (см. рисунок).

Одинаковое изменение температуры ΔT вызывает намного большее изменение фактора Карно τ_c (а следовательно, и термического КПД цикла) в области низких температур.

Так, повышение температуры на 20 К в области даже не очень высоких температур (например, от 500 до 520 К) меняет фактор Карно τ_c с 0,4 на 0,42 (т. е. на

0,02). Такое же изменение температуры в сторону понижения в области низких температур (например, от 260 до 240 К) меняет τ_c с $-0,13$ на $-0,22$ (т. е. на 0,9 по абсолютной величине, что в несколько раз больше).

В этой ситуации, естественно, представляется целесообразным расширение теплосилового цикла «вниз». Здесь по незыблемым законам термодинамики «каждый градус все дороже» и термический КПД цикла растет при его расширении «вниз» гораздо быстрее, чем при движении «вверх».

Для нашей страны, где температура окружающей среды в большинстве районов долгое время держится на уровне гораздо ниже 0 °С, такое расширение границ цикла может дать весьма существенный эффект.

Те же соображения, только «с обратным знаком», относятся к холодильной технике: понижение температуры отвода тепла в холодильных циклах может тоже дать существенную экономию энергии.

Однако возникает целый комплекс вопросов, от решения ко-

торых зависит выбор – развивать низкотемпературное направление в теплоэнергетике и холодильной технике или нет, и если развивать, то каким образом? Какую роль здесь может сыграть холодильная техника, «привыкшая» к низким температурам?

Чтобы ответить на эти вопросы с достаточной уверенностью, их необходимо обсудить в разных аспектах как с термодинамической, так и практически инженерной точек зрения.

Термодинамический аспект проблемы

Из элементарных термодинамических соотношений, относящихся ко второму закону термодинамики, следует, что понижение температуры теплоприемника (в интересующем нас случае — температуры окружающей среды T_{oc}) при заданной температуре теплоотдатчика (в данном случае — греющей среды) приводит в прямом цикле при прочих равных условиях к увеличению количества получаемой (отводимой) работы на $\Delta W_{гор}$. В обратном цикле такое же понижение температуры окружающей среды при прочих равных условиях уменьшает затраты работы на $\nabla W_{хол}$. Термический КПД теплового цикла при этом возрастает так же, как и холодильный коэффициент обратного цикла.

В табл. 1 даны значения отво-

димой работы W для идеально-го случая – прямого цикла Карно (количество подводимого тепла $Q = 1,0$ Дж).

Для реальных тепловых станций значения W будут, естественно, существенно ниже. Однако относительные значения величин работы сохранятся с незначительными отклонениями.

Из данных табл. 1 видно, что во всех случаях – как для высоких температур подвода тепла T_r (1000...1500 К), так и относительно низких (400...600 К) – отводимая работа при понижении T_{oc} существенно возрастает. Важно, что наибольший рост наблюдается в циклах с более низким уровнем T_r . Так, если для цикла с $T_r = 1500$ К увеличение отводимой работы при $T_{oc} = 240$ К по сравнению с $T_{oc} = 300$ К составляет ~5 %, а при $T_{oc} = 250$ К ~4 %, то в цикле с $T_r = 1000$ К увеличение работы при том же изменении T_{oc} существенно больше: ~8 и 7 %.

Самое значительное увеличение термического КПД ($\sim 16\%$) наблюдается при относительно невысокой температуре $T_r = 600\text{ К}$. Эти цифры заставляют задуматься над некоторыми практически возможными реализациями таких циклов в теплоэнергетике.

Что касается холодильной отрасли, то, казалось бы, здесь «сам Бог велел» использовать

природный холод. В начальный период ее развития так и было [1]. Однако в дальнейшем, естественно, пришлось перейти на массовое использование техники, надежно обеспечивающей в новых условиях пищевую промышленность, сельское хозяйство и другие отрасли холодом любых параметров. Природный холод долго держал свои позиции, но, за редким исключением, был фактически устранен из практики.

Однако в последнее время в связи с обострением энергетических и экологических проблем интерес к природному холоду возобновился: его использование (и не только в форме льда) возрастает. Это относится как к непосредственному охлаждению холодным атмосферным воздухом в зимнее время*, так и к применению природного холода в сочетании с холодильными машинами.

В табл. 2 приведены данные для обратного цикла Карно, аналогичные тем, которые представлены в табл. 1 для теплосилового цикла.

Из табл. 2 следует, что даже сравнительно небольшое понижение температуры конденсации T_{oc} в холодильном цикле может существенно экономить энергию на привод компрессора. Так, понижение этой температуры с 300 до 280 К дает при температуре охлаждаемого объекта $T_0 = 260$ К экономию энергии в 2 раза, а до 270 К – в 4 раза (расчет относительных значений работы при разных тем-

* Мне пришлось однажды услышать возмущение домашней хозяйки (правда, с инженерным образованием): «Что за глупость: я должна платить за электроэнергию, которую жрет мой холодильник, хотя рядом за окном мороз минус 15 градусов!»

Таблица 1

Работа теплосилового (прямого) цикла Карно при различных температурах источника T_r и приемника T_{oc} тепла

T_r, K	Отводимая работа цикла W (Дж) при температуре окружающей среды T_{oc}, K						
	300	290	280	270	260	250	240
1500	0,80	0,81	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84
1200	0,75	0,76	0,77	0,78	0,78	0,79	0,8
1000	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76
800	0,62	0,64	0,65	0,66	0,68	0,69	0,70
600	0,50	0,52	0,53	0,55	0,57	0,58	0,60

Работа холодильного (обратного) цикла Карно при различных температурах охлаждаемого объекта T_o и окружающей среды T_{oc}

Таблица 2

Температура охлаждаемого объекта T_o , К	Затраты работы W (Дж) при температуре окружающей среды T_{oc} , К				
	300	290	280	270	260
290	0,034	0	—	—	—
280	0,071	0,036	0	—	—
270	0,111	0,074	0,037	0	—
260	0,154	0,115	0,077	0,038	0
250	0,200	0,160	0,120	0,074	0,038

пературах конденсации в реальных циклах будет несущественно отличаться от приведенных величин). Техническая реализация таких возможностей путем подвода холодного атмосферного воздуха к конденсаторам установок не вызовет неразрешимых технико-экономических и организационных проблем. Пренебрегать этим, по-видимому, не следует.

Положение в теплоэнергетике в этом смысле несколько сложнее. Там практическое использование низких температур окружающей среды требует решения ряда серьезных инженерных проблем. Если оставить в стороне неизбежно существующий в такого рода ситуациях консерватизм, то остаются реальные трудности, связанные с двумя главными вопросами: выбором рабочего тела нового теплосилового цикла и работой оборудования в переменном режиме, который диктуется изменениями температуры окружающей среды. В решении первого из них опыт холодильной техники уже оказался полезным.

Выбор рабочего тела нового теплосилового цикла

Среди многочисленных рабочих тел, предлагаемых для замены воды в теплосиловых циклах, постепенно вышли на первое ме-

сто применяемые в низкотемпературных циклах хорошо изученные хладагенты: сначала R12, а затем аммиак.

К настоящему времени уже накоплен большой опыт использования неводных рабочих тел в теплоэнергетике; приоритет здесь принадлежит нашей стране.

Еще в 1955 г. Л.М. Розенфельд предложил использовать в теплосиловых установках бинарный водоаммиачный цикл [6], а в 1967 г. на Камчатке была пущена первая опытная термальная электростанция на R12.

Однако основным направлением в «неводной» теплоэнергетике стало все же водоаммиачное, основанное на цикле (вернее, «циклах») А. Калины*, разработанных им при активной поддержке известного американского ученого — специалиста в области термодинамики М. Трайбуса.

Опиравшийся на опыт и традиции холодильной техники выбор смеси $NH_3 + H_2O$ оказался чрезвычайно удачным. Как аммиак, так и водоаммиачные смеси хорошо изучены. Аммиак занимает второе место пос-

* А.И. Калина закончил Одесский институт холодильной промышленности. В 70-х годах эмигрировал в США, где организовал фирму «Exergy Inc.», успешно работающую в области создания водоаммиачных циклов электростанций [7, 9].

ле воды по теплоте парообразования; он широко используется не только в холодильной технике, но и в химической технологии. Циркулирующие среди энергетиков слухи об опасностях, связанных с использованием аммиака, мягко говоря, сильно преувеличены. Здесь не возникает проблем, тем более что в теплоэнергетических системах аммиак работает в смеси с водой. Он дешев и доступен, не оказывает корродирующего действия на железо и его сплавы, растворим в воде во всем диапазоне концентраций. Наконец, что очень важно, в водоаммиачном теплосиловом цикле даже при низких температурах, которые могут встретиться на практике, давление двухфазной смеси превышает атмосферное. Значение этого обстоятельства трудно переоценить как с конструктивной, так и эксплуатационной точек зрения.

Экспериментальная электростанция мощностью 3 МВт, построенная Калиной на водоаммиачном рабочем теле, показала высокую эффективность этого цикла как в термодинамическом, так и эксплуатационном планах [7, 9].

Единственным негативным результатом оказалась невозможность поднять верхнюю температуру цикла за пределы 550–600 °С из-за неизбежной диссоциации аммиака на водород и азот. Надежды на то, что аммиак в смеси с водой не начнет диссоциировать при такой температуре, не оправдались.

Что касается температур, лежащих ниже границы диссоциации, то водоаммиачный цикл Калины уже исправно работа-

ет на четырех установках – в США, Японии и Исландии. Планируется создание и других станций с мощностями более 100 МВт.

Различные варианты цикла Калины, как реализованные, так и проектируемые, имеют сходные показатели: все они по-прежнему работают при температурах конденсации, лежащих существенно выше 0°C .

В верхней части цикла границы повышения температур, как уже указывалось, определяются началом диссоциации аммиака, поэтому такие циклы могут преимущественно применяться как «Bottom cycles» на атомных и геотермальных электростанциях.

Но при этом особенно важно, что они, как уже указывалось, могут успешно использоваться и при существенно более низких температурах среды, вплоть до тех, которые соответствуют самым сильным сибирским морозам. При этом в зимнее время термический КПД существенно возрастет, а давление в конденсаторе останется избыточным; все трудности, связанные с вакуумом и большими удельными объемами пара, отпадут [8].

Естественно, что переход на новое рабочее тело — водоаммиачную смесь, связанный с возможностью создания ТЭС, эффективно работающих с выдачей дополнительной электроэнергии в зимнее время, — дело, требующее серьезной проектной и экспериментальной проработки. неизбежно возникнут и некоторые специфические трудности практически инженерного характера, преодоление которых потребует дополнительных усилий.

Трудности, связанные с практическим использованием низких температур окружающей среды

Первая трудность – переменный режим работы станции вследствие неизбежных изменений температур окружающей среды – как сезонных, так и сравнительно краткосрочных, определяемых метеорологическими факторами. Здесь возникает ряд задач, связанных с работой турбин и теплообменной аппаратуры в переменном режиме и созданием соответствующих систем регулирования.

Что касается сезонных изменений температур окружающей среды, то задача регулирования облегчается тем, что они происходят в течение относительно длительного отрезка времени, а амплитуды колебаний температуры при краткосрочных изменениях погоды обычно невелики.

Вторая трудность – это переход на воздушные конденсаторы. Задача облегчается тем, что опыт успешного конструирования и применения воздушных конденсаторов уже имеется как в холодильной технике, так и в теплоэнергетике (например, на Мутновской термальной электростанции на Камчатке) [5].

Разумеется, преодоление этих трудностей потребует определенных усилий и опытной проверки. Однако в целом они не выводят задачу за пределы уже реализованных возможностей современной техники. Накопленный энергетикой и холодильной техникой опыт создания и эксплуатации близких по характеру технических систем, несомненно, позволит их решить.

Положительные стороны ис-

пользования низкотемпературного резерва, который дает сама природа для развития энергетики, очевидны. Дискуссия может идти только о технической стороне дела, масштабах работы и об экономических оценках тех преимуществ, которые оно может дать в каждом конкретном случае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бродянский В.М.* От твердого льда до жидкого гелия. История холода. – М.: Энергоатомиздат, 1995.
2. *Бродянский В.М., Фраттиер В., Михалец К.* Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. *Гохштейн Д., Верживкер Г.* Проблема использования неводных паров в энергетике// Теплоэнергетика. 1966. № 1.
4. *Паршев А.П.* Почему Россия не Америка. – М.: Форум, 1999.
5. *Поваров О.А. Саакян В.А. и др.* Бинарные электрические станции// Тяжелое машиностроение. 2002. № 8.
6. *Розенфельд Л., Ткачев А.* Холодильные машины и аппараты. – М.: Госторгиздат, 1955.
7. *Kalina A.* Combined cycle system with novel bottoming cycle, ASME J. Eng. Power 106, 737–742, 1984.
8. *Kalina A., Brodianski V.* Exergy analysis of Kalina cycles thermodynamic Efficiency. Comm. «Flowers» 97.
9. *Kalina A., Leibowitz H., Lazzori L., Diotti F.* Recent development in the application of Kalina cycle for geothermal plants. GRC, 1995.
10. *Wall G., Chia-Chin Chuang, M.Ighida* Exergy study of the Kalina cycle. Analyses and Design of Energy systems AES-Vol. 10–3, ASME, 1990.