Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1765)

Никола Леонар Сади Карно (1796–1832)

(Прижизненные портреты из кабинетной галлереи А. М. Архарова)

Статья подготовлена к знаменательным датам публикации двух гениальных сочинений: 260-летию диссертации Михаила Ломоносова «Размышления о причине тепла и холода» (1744 г.) и 180-летию мемуара Сади Карно «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824 г.), которые легли в основание классической термодинамики.

The remarkable dates of publication of two works of genius have induced this article: 260 anniversary of the dissertation of Mikhail Lomonosov "Reflections on the cause of heat and cold" (1744) as well as 180 anniversary of the memory of Sadi Carnot "Reflections on a motive power of fire and on machines apt to develop this power" (1824); both works became the basis of classical thermodynamics.

О движущей силе низкотемпературной теплоты (холода) или еще раз о предельных значениях коэффициентов взаимного преобразования теплоты и работы (коэффициентах Карно)

Д-р техн. наук, проф. **А.М. АРХАРОВ**, канд. техн. наук **И.А. АРХАРОВ**,
д-р техн. наук **А.А. ЖЕРДЕВ**, канд. техн. наук **И.Г. СУРОВЦЕВ**
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Д-р техн. наук, проф. **В.В. СЫЧЕВ**
МЭИ (Технический университет)

Теплота давно и успешно используется для получения механической работы и электроэнергии. Единственное, что отличает понятия теплоты и холода, – это температура. Холод, как и утверждал М.В. Ломоносов, является низкотемпературной теплотой. Непрерывное преобразование теплоты в механическую работу или электроэнергию реализуется энергоустановками, в которых теплота переходит от источника с высокой температурой к приемнику с более низкой температурой в точном соответствии с ходом рассуждений С. Карно и его аналогией с падением воды. Пока существует разность температур источника и приемника теплоты, возможно ее преобразование в работу. В области умеренных и низких температур эти принципы, разумеется, сохраняются.

По Карно, максимально возможный коэффициент непрерывного* преобразования теплоты в механическую работу или электроэнергию не зависит от свойств рабочего тела цикла и определяется выражением, современный вид которого восходит к Р. Клаузиусу:

$$\eta_к = (T_и - T_{пр})/\ T_и = (\ T_г - T_{пр})/\ T_г,$$

где $T_и\,(T_г)$ – температуры источника теплоты (горячего «резервуара»);

$T_{пр}$ – температура приемника (стока) теплоты или холодного «резервуара».

Коэффициент $\eta_к$ – величина безразмерная, однако она имеет конкретный физический смысл: это отношение полученной работы к подведенной при $T_г$ теплоте (Дж/Дж). Физический смысл этого соотношения сохраняется и при выражении в единицах мощности (Вт/Вт).

Техническая работоспособность (эксергия) теплоты горячего источника определяется произведением ее величины на коэффициент преобразования.

Обратим внимание на то обстоятельство, что значения $\eta_к$ стремятся к единице в двух случаях: при $T_г \to \infty$ и любых реальных значениях $T_{пр}$, а также при $T_{пр} \to 0$ и любых реальных величинах $T_г$.

Для планеты Земля, на которой нашей цивилизацией построена феноменологическая термодинамика, существует понятие температуры излучательного равновесия T_0, приблизительно оцениваемой в 300 К (27 °С). Эту температуру часто считают осредненной температурой окружающей среды и при оценке предельной эффективности практических энергетических

* *Речь идет о непрерывном преобразовании, осуществляемом посредством организации циклов. В отдельно взятых (дискретных) процессах теплота может целиком переходить в работу, например в процессах изотермического расширения идеального газа.*

систем для получения электрической мощности ее приравнивают температуре приемника или стока теплоты $T_{пр}$. В этих случаях графическая зависимость $\eta_к = f(T_г)$ имеет вид кривой *1* на рис. 1.

В действительности температура нашей планеты неоднородна, и на Земле существуют достаточно емкие источники и стоки теплоты с температурой как выше, так и ниже 300 К. К их числу можно отнести теплые и холодные течения, гейзеры, вулканы, «вечную мерзлоту», природные льды, воду, воздух, грунт с характерными сезонными и суточными изменениями температуры и др.

Температурная неоднородность (анизотропия) характерна также для атмосферы Земли и для объектов, находящихся в ближнем космосе, для Луны и других планет Солнечной системы. Анизотропия окружающей среды может использоваться как для получения энергии, так и в процессах ее утилизации. Создание солнечных источников тока, солнечных холодильных и тепловых установок, использование природного холода в технике уже началось. Заметим, что существующие на Земле «механическая» и гравитационная неоднородности, проявляющиеся в форме разнообразных течений воздуха и воды, также давно используются для получения энергии (ветро- и гидро- энергоустановки, приливные гидростанции и др.). Нельзя исключать и возможности практического использования существующих электрической и магнитной неоднородностей, а также создания в будущем установок, которые одновременно утилизировали бы различные неоднородности окружающей среды. По-видимому, анизотропия в широком смысле – одна из фундаментальных особенностей физического пространства.

Существование и расширяющееся использование как естественных (природных), так и искусственных «резервуаров» низкотемпературной теплоты (холода) побуждает к более внимательной оценке ее технической работоспособности. На первый взгляд это может показаться абсурдным, поскольку низкотемпературный тепловой резервуар может быть только приемником теплоты и никакой движущей силой не обладает (когда не существует еще более низкотемпературного приемника). Если в низкотемпературный резервуар может быть передана теплота от более теплого, но тоже низкотемпературного источника, то корректная постановка вопроса о движущей силе низкотемпературной теплоты может относиться только к этой передаваемой теплоте. При таком подходе следовало бы поставить в кавычки слова о движущей силе низкотемпературной теплоты в названии статьи.

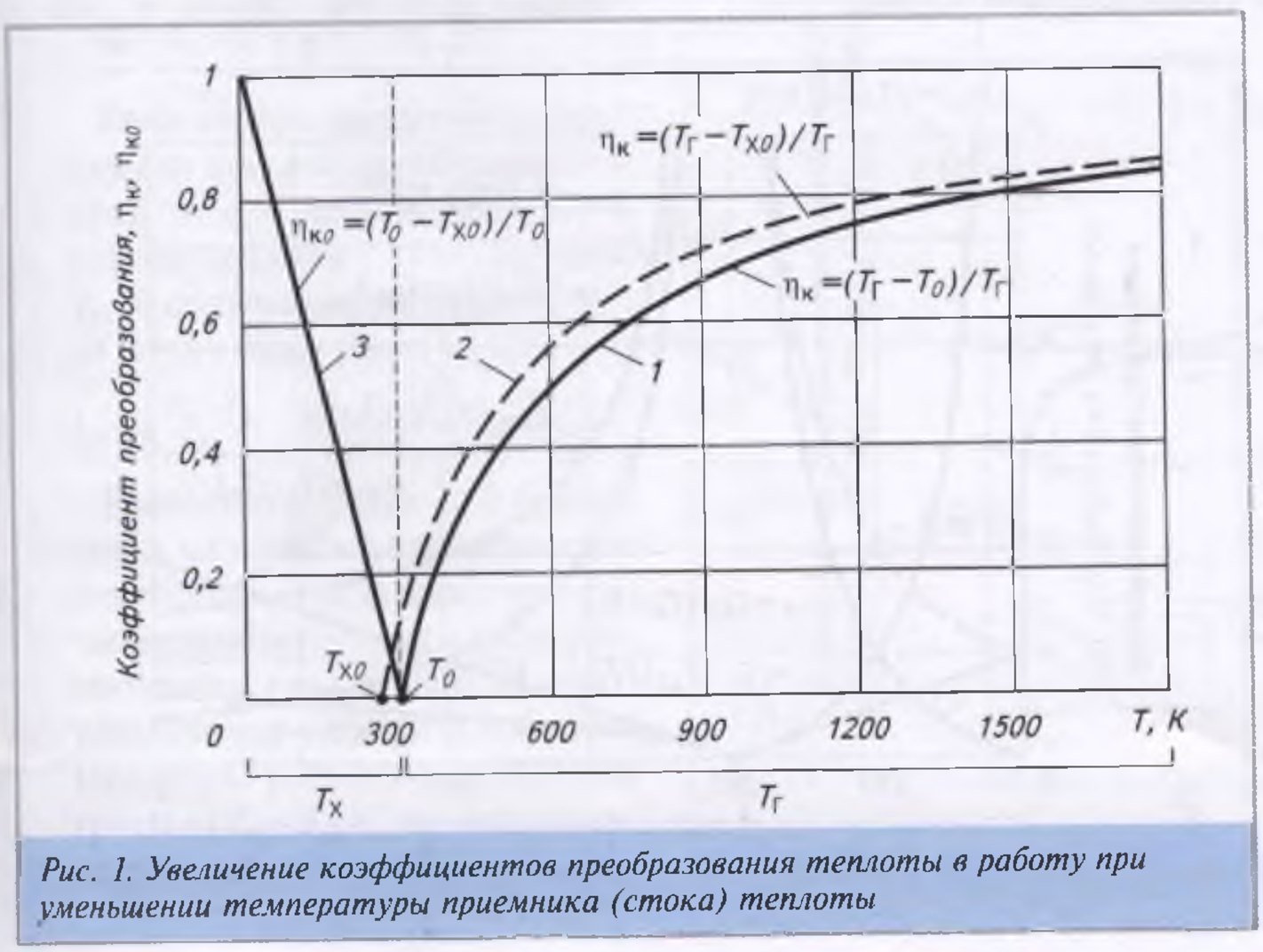

Рис. 1. Увеличение коэффициентов преобразования теплоты в работу при уменьшении температуры приемника (стока) теплоты

Однако возможен и иной ход рассуждений. Очевидно, что двигатели, работающие с более холодными приемниками теплоты, способны произвести бо́льшую (или дополнительную) работу по сравнению с двигателями, работающими в стандартных условиях. Вообще говоря, работу такие двигатели могут производить, если тепло отбирается от окружающей среды и передается источнику холода, температура которого ниже температуры окружающей среды. В последнем случае субъектом, обусловившим термодинамическое неравновесие с окружающей средой, будет источник холода и можно, сохраняя терминологию Карно, говорить о «движущей силе холода».

Любое движение, включая и перенос теплоты, возникает тогда, когда нарушается какое-либо равновесие. Роль движущей силы принадлежит субъекту, не находящемуся в равновесии с окружающей средой. В классической схеме Карно это «огонь», а в данном конкретном случае – «холод». С этой точки зрения выражение «движущая сила холода» представляется вполне корректным. Разумеется, и в этом случае для совершения работы будет расходоваться теплота, отбираемая из более теплого источника, например атмосферы.

Если (в случае использования температурной неоднородности) для стоков теплоты принимать значения температур равными $T_{пр} = T_{х0} < T_0$, то и значения $\eta_к$ соответственно изменятся в бо́льшую сторону (кривая *2* на рис. 1).

При наличии теплового резервуара (стока теплоты) с температурой, более низкой, чем T_0, теплота окружающей среды будет обладать потенциальной работоспособностью, максимальная величина которой пропорциональна коэффициенту преобразования Карно $\eta_{к0}$ (линия *3* на рис. 1):

$\eta_{к0} = (T_0 - T_{x0})/T_0$ – отношение полученной работы к подведенной при T_0 теплоте, Дж/Дж.

Обратная величина

$\zeta_{кх} = T_0/(T_0 - T_{x0})$

определяет количество теплоты в Дж при T_0, необходимой для генерации 1 Дж работы. Естественно, что при $T_{x0} \to T_0$ величина $\zeta_{кх}$ устремится к бесконечности (рис. 2).

Развитие холодильной техники, а в широком смысле техники и физики низких температур, в конце XIX века и в XX столетии реально обратило тепловой двигатель в тепловой насос и убедительно подтвердило гениальную универсальность положений Карно. Искусственный холод генерируется только при соответствующих затратах, например, электрической или тепловой энергии. Минимально необходимая величина электрической мощности при получении холода определяется соотношением Карно. Например, при генерации холодопроизводительности (холодильной мощности) на температурном уровне T_x и передаче отводимой теплоты и затрачиваемой энергии в тепловой резервуар с температурой T_0 коэффициент удельных затрат мощности:

$(\varphi_{min})_x = \varphi_{кх} = (T_0 - T_x)/T_x$ – отношение затраченной электрической мощности к генерированной холодильной мощности при T_x, Вт/Вт.

Чем ниже требуемая температура T_x, тем бо́льшую мощность необходимо затратить. При $T_x \to 0$ $\varphi_{кх} \to \infty$ (см. рис. 2), что вполне подтверждается практикой получения криогенных и сверхнизких температур. Обратная величина $1/\varphi_{кх} = \varepsilon_{кх}$, называемая холодильным коэффициентом Карно (в зарубежной литературе COP), представляет собой предельно возможное значение коэффициента преобразования затрачиваемой работы (электрической мощности) в холодопроизводительность (холодильную мощность):

$(\varepsilon_{max})_x = \varepsilon_{кх} = T_x/(T_0 - T_x)$ – отношение холодильной мощности, генерированной при T_x, к затраченной мощности, Вт/Вт.

Значения $\varepsilon_{кх}$ могут быть как больше, так и меньше единицы.

Холодильная техника стала базой создания тепловых насосов, в том числе для так называемого динамического отопления, для которых коэффициент непрерывного преобразования $\varepsilon_{кт}$ электрической мощности в тепловую мощность на температурном уровне $T_г > T_0$ больше единицы:

$(\varepsilon_{max})_т = \varepsilon_{кт} = T_г/(T_г - T_0)$ – отношение тепловой мощности, генерированной при $T_г$, к затраченной мощности, Вт/Вт. Коэффициент $\varepsilon_{кт}$ в зарубежной литературе обозначается тоже как COP. В этом случае на температурный уровень $T_г$ переносится теплота окружающей среды, предельная величина которой определяется соотношением Карно:

$\zeta_{кт} = T_0/(T_г - T_0)$ – отношение переносимой тепловой мощности при T_0 к затраченной мощности, Вт/Вт.

Значение $\zeta_{кт}$ стремится к бесконечности при $T_г \to T_0$.

Обратная величина $(\varphi_{min})_{кт} = \varphi_{кт} = (T_г - T_0)/T_0$ – отношение затраченной мощности к перенесенной тепловой мощности при T_0, Вт/Вт – определяет величину минимально необходимой затраты энергии для переноса теплоты с температурного уровня T_0 на уровень $T_г$. Понятно, что при $T_г \to T_0$ величина $\varphi_{кт}$ стремится к нулю. При температуре более 600 К коэффициент $\varphi_{кт}$ принимает значение больше единицы. Эта ситуация отражена на рис. 2.

Линия $\varepsilon_{кт}$ на рис. 2 соответствует предельным значениям коэффициента преобразования электрической мощности в теплоту на температурном уровне $T_г$. В этом случае также логично, что при $T_г \to T_0$ величина $\varepsilon_{кт} \to \infty$, а при $T_г \to \infty$ $\varepsilon_{кт} \to 1$. Эта ситуация получила полное практическое подтверждение при создании тепловых насосов и систем динамического отопления.

Мы подошли к вопросу, имеющему определенное методологическое значение. Линия $\eta_{к0}$ на

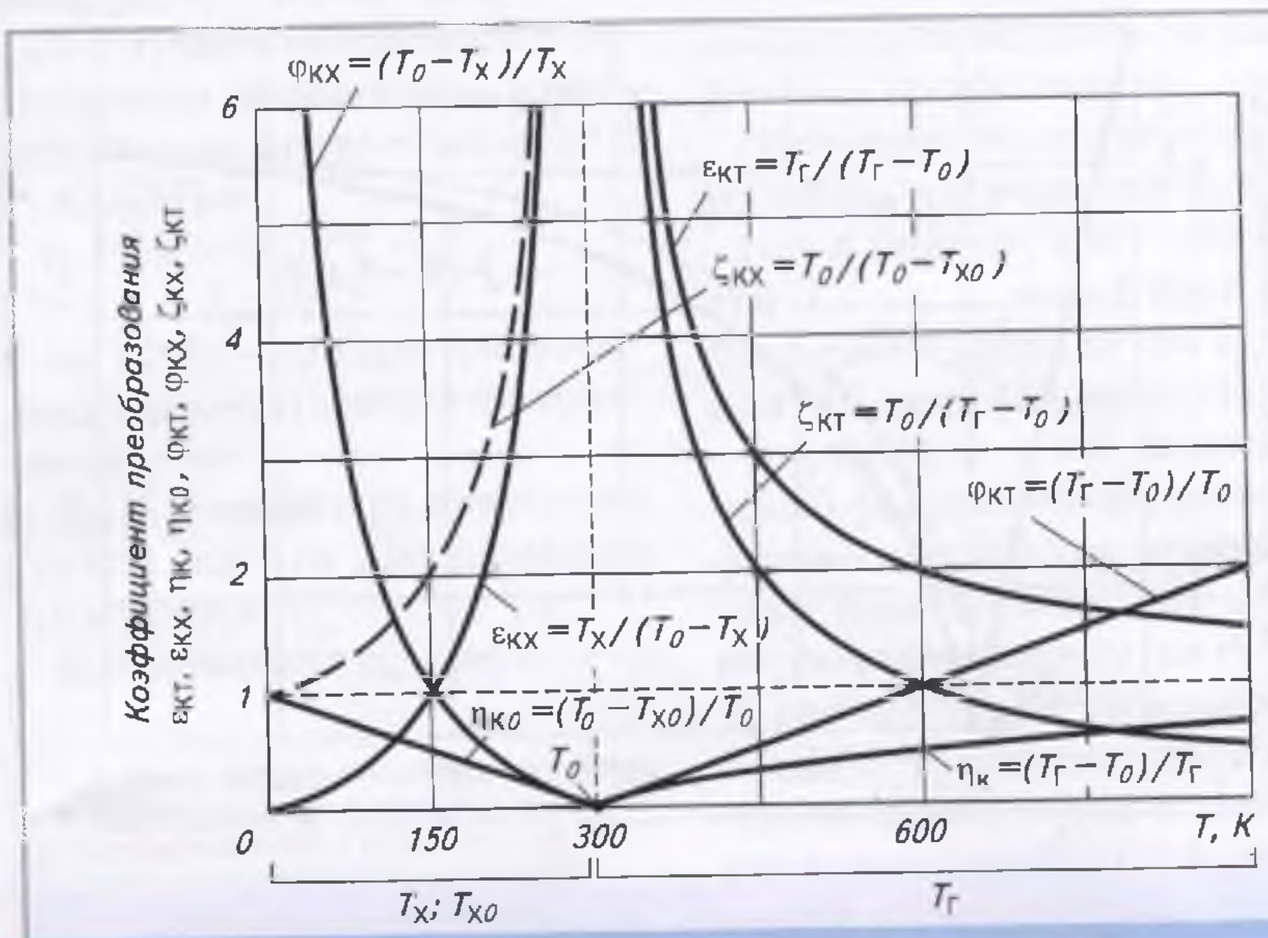

Рис. 2. Коэффициенты преобразования как функции температуры

рис. 2 — это максимальные значения коэффициента преобразования теплоты окружающей среды в работу при наличии, например, более холодного приемника теплоты с температурой T_{x0}. Поскольку рассматриваются полностью обратимые превращения, то кривая $\varphi_{кх}$ помимо своего прямого смысла формально выражает максимально возможный коэффициент обратного преобразования генерированного холода в работу (формально потому, что при наличии холодного стока с температурой T_{x0} работа будет генерироваться в результате перехода теплоты с более высокого температурного уровня, например из окружающей среды, на уровень T_{x0}). Именно поэтому кривые $\eta_{к0}$ и $\varphi_{кх}$ не совпадают. Это можно пояснить следующим образом. Предположим, располагая окружающей средой с температурой T_0, мы генерировали холод в количестве q_x на температурном уровне T_x. При этом в идеальном варианте в холодильной машине Карно необходимо затратить работу

$$l_{кх} = q_x \frac{T_0 - T_x}{T_x}$$

и передать в окружающую среду энергию q_0, равную сумме

$$q_0 = q_x + q_x \frac{T_0 - T_x}{T_x} = q_x \frac{T_0}{T_x}.$$

Если теперь представить идеальный процесс преобразования теплоты q_0 в работу, располагая стоком теплоты с температурой T_x, то полученная работа двигателя Карно будет равна

$$l_{кд} = q_0 \frac{T_0 - T_x}{T_0} = q_x \frac{T_0}{T_x} \frac{T_0 - T_x}{T_0} = q_x \frac{T_0 - T_x}{T_x}.$$

Равенство величин $l_{кх}$ и $l_{кд}$ подтверждает, что в итоге ничего не изменилось, так как все процессы были обратимыми и такое рассмотрение правомочно. Из него следует, что работоспособность (эксергия) теплоты окружающей среды $q_0(T_0 - T_x)/T_0$ численно равна величине $q_x(T_0 - T_x)/T_x$, т. е. величине минимально необходимой для генерации холода работы. Понятно, что, располагая величиной q_x, потенциально можно получить работу $l_{кд}$, т. е. может быть возвращена работа $l_{кх}$.

Что же это за величина $q_x(T_0 - T_x)/T_x$, как ее правильно называть — работоспособностью (эксергией) холода q_x или движущей силой холода q_x? Или это всего лишь величина минимально необходимой затраты энергии в идеальных процессах генерации холода q_x, которые по определению обратимы, и поэтому $l_{кх}$ может быть возвращена? Нам представляется, что в соответствии с приведенными выше суждениями возможны все три толкования этой величины.

Техническим системам безразлично, естественный или искусственный холодный резервуар принимает теплоту. Поэтому понятие работоспособности теплоты (эксергии) следует относить к теплоте, отбираемой из более высокотемпературного источника. С этой точки зрения низкотемпературная теплота (холод) обладает работоспособностью (движущей силой), когда существует еще более низкотемпературный приемник теплоты. С другой стороны, можно рассматривать тепловую машину, работающую в температурном диапазоне между нагретым за счет сжигания топлива (или иным способом) горячим источником и холодным источником, температура которого может быть как больше, так и меньше атмосферной. В последнем случае можно говорить об участии в получении работы как «движущей силы огня», так и «движущей силы холода». Поэтому движущую силу холода можно определить как работу двигателя Карно, у которого теплота подводится при средней температуре окружающей среды, а отводится при температуре холодного источника, или как дополнительную работу двигателя Карно, совершаемую им при использовании холодного источника с температурой ниже средней температуры окружающей среды.

Предельные значения коэффициентов преобразования имеют принципиальное значение, поскольку позволяют однозначно оценить степень термодинамического совершенства самых раз-

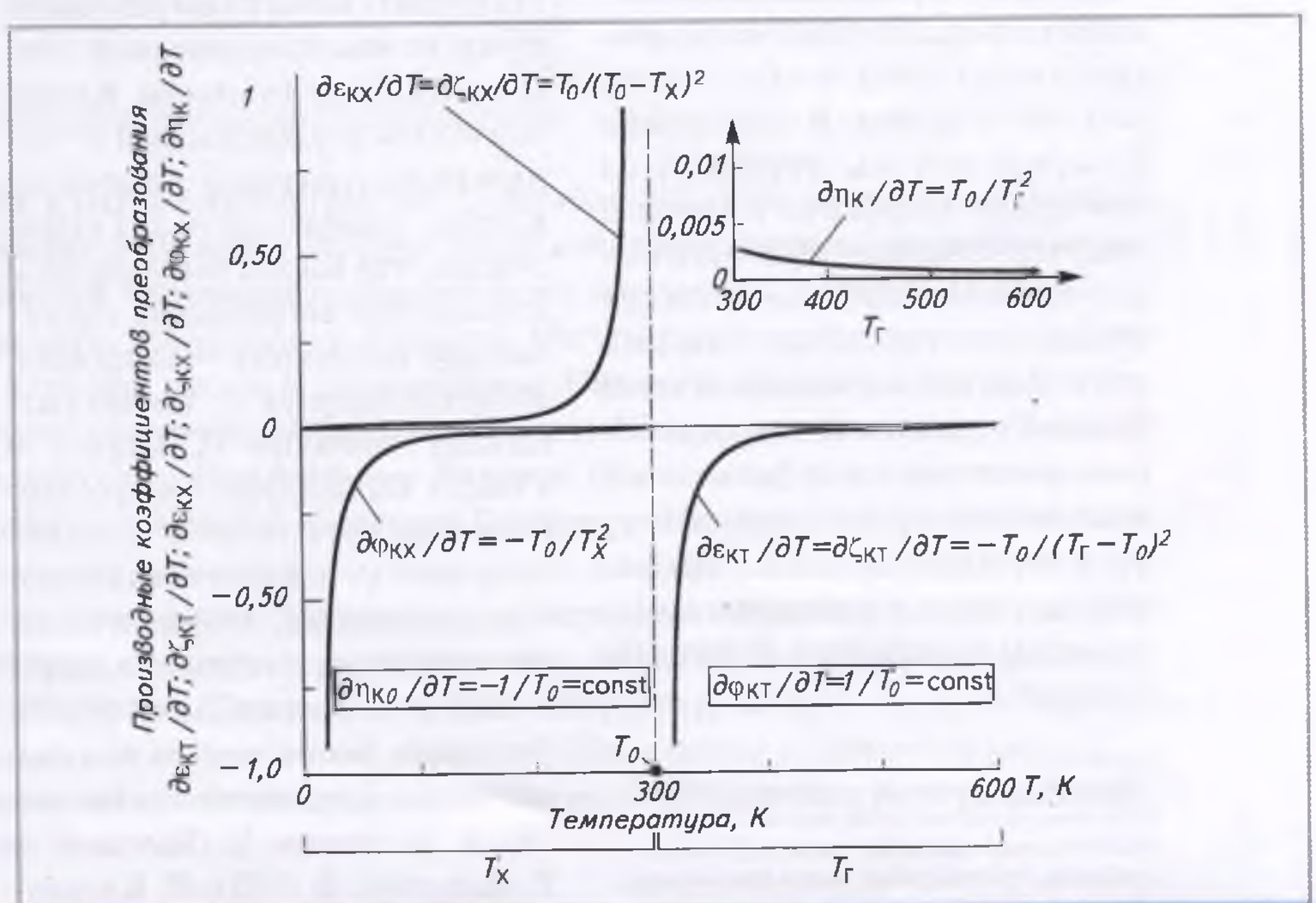

Рис. 3. Производные коэффициентов преобразования как функции температуры

личных циклически работающих технических систем, преобразующих теплоту в работу или работу в теплоту (холод). Это хорошо известно. Напомним в качестве примера, что степень термодинамического совершенства генераторов холода определяется соотношением

$$(\zeta_{терм})_x = \frac{(\varphi_{min})_x}{(\varphi_д)_x} = \frac{(\varepsilon_д)_x}{(\varepsilon_{max})_x},$$

где $(\varphi_д)_x$ и $(\varepsilon_д)_x$ – действительные значения коэффициента удельных затрат мощности φ и холодильного коэффициента ε для реальных криогенераторов. Производные величины коэффициентов преобразования по температуре показывают, в каких диапазонах температур они изменяются наиболее сильно, а где несущественно (рис. 3).

Надо сказать, что вопрос об эксергетической ценности холода в отечественной литературе был, по-видимому, впервые поставлен профессором В.С. Мартыновским*. Однако никаких графических интерпретаций им не давалось. Ряд работ в этом направлении опубликован профессором В.М. Бродянским. Несомненно, что различные методологии имеют свои особенности, чем они и ценны. В ходе наших рассуждений мы исходили из принципа Норберта Винера о том, что «никакая обработка информации не может увеличить ее объема», и стремились показать это в отношении основной идеи Карно о независимости предельных значений коэффициентов взаимного преобразования теплоты и работы от свойств рабочих тел циклов применительно ко «всем мыслимым тепловым машинам».

** Термин «эксергия» был введен в 1956 г., и по смыслу корней слов, его образующих, означал внешнюю работу или работоспособность, претендуя на более лаконичное название известного понятия «техническая работоспособность», синонимом которого этот термин и является.*

Небезынтересна история мемуара Сади Карно. Его фундаментальный труд был издан в 1824 г. и в течение многих лет оставался не замеченным современниками, несмотря на то, что именно в те годы проблема преобразования теплоты в механическую работу интенсивно разрабатывалась. Этому обстоятельству есть свои объяснения. Уже после смерти Карно его труд был оценен Б.Клапейроном (в 1834 г. он ввел цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат, который принято называть циклом Карно), а спустя 24 года, в 1848 г., основополагающий характер сочинения Карно был заново раскрыт У. Томсоном (лордом Кельвином). В частности, шкала температур Кельвина, окончательно принятая как международная только в 1968 г., была построена именно на идеях Карно. Выводы Карно и его теорема, которые были сформулированы, исходя из отвергнутой им же впоследствии концепции «теплорода» как материальной, но невесомой субстанции, в настоящее время составляют незыблемую часть фундамента классической термодинамики (выводы Карно оказались независимыми от понимания природы теплоты). Кстати, профессор А.А. Гухман считал, что Карно был близок и к введению координаты термического состояния – энтропии. В своем мемуаре С. Карно различает понятия «Chaleur» и «Valeur Calorifique» (в русском переводе «теплота» и «теплотворность» соответственно). Представляется, что, если бы не его внезапная смерть от холеры в 1832 г., он неизбежно нашел бы этому более глубокие обоснования. Его работу продолжили и развили У. Томсон и Р. Клаузиус. В 1850 г. Р. Клаузиус окончательно разрушил концепцию «теплорода», ввел понятие энтропии и обосновал современную запись для коэффициента максимально возможного преобразования теплоты в работу по Карно.

В 2004 г. исполняется 260 лет со времени представления М.В. Ломоносовым в Академию наук диссертации «Размышления о причине тепла и холода», в которой сформулирована исходная концепция корпускулярной, а впоследствии механической, теории теплоты: «Достаточное основание теплоты заключается в движении. А так как движение не может происходить без материи, то необходимо, чтобы достаточное основание теплоты заключалось в движении какой-то материи». (Избранные труды по химии и физике. – М.: АН СССР, 1961.)

М.В. Ломоносов предвидел существование абсолютного нуля (нуля термодинамической температуры). Он писал: «Следовательно, по необходимости должна существовать наибольшая и последняя степень холода, которая должна состоять в полном прекращении вращательного движения частиц». И далее: «Хотя высшая степень холода возможна, однако нет недостатка в данных, говорящих о том, что таковая на земноводном шаре нигде не существует».

Характерно, что М.В. Ломоносов различал теплоту и холод только по значению температуры: «Первая и нижняя температурная область начинается от самого низкого градуса теплоты, или – что то же самое – от наибольшего градуса стужи, который пока еще никем не отмечен и не показан. Она оканчивается при температуре начинающегося замерзания воды...».

Любопытен интерес М.В. Ломоносова к задачам получения низких температур. Он писал: «Смешением поваренной соли со снегом или толченым льдом фи-

зики получают материю, называемую по производимому ею действию холодильной, так как вода, поставленная в нее в каком-либо сосуде, превращается в лед». Он дал объяснения этим процессам и предложил новые варианты: «Селитра, в (теплой же) воде разведенная, дает столь сильную стужу, что она (в пристойном сосуде) среди лета замерзает».

Работа С. Карно появилась на 80 лет позднее труда М.Ломоносова! Многие исследователи полагали, что Карно был достаточно знаком с идеями о механической природе теплоты, которые развивались и в Европе (Дэви, Томпсон – лорд Румфорд, Юнг, Ампер и др.), однако он не воспользовался ими в своем мемуаре. Он сформулировал свою исходную позицию следующим образом: «Чтобы рассмотреть принцип получения движения из тепла во всей его полноте, надо его изучить независимо от какого-либо механизма, какого-либо определенного агента; надо провести рассуждения, приложимые не только к паровым машинам, но и ко всем мыслимым тепловым машинам, каково бы ни было вещество, пущенное в дело, и каким бы образом на него не производилось воздействие». Из его последующих рукописей становится ясным, что он полностью отошел от концепции теплорода: «Тепло – это не что иное, как движущая сила, или, вернее, движение, изменившее свой вид... Это движение частиц тел ...» (Публикация 1878 г.). Тем не менее никаких изменений в текст своего мемуара он не внес.

Два гения России и Франции – Михаил Ломоносов и Сади Карно – проложили пути к пониманию как природы теплоты (холода), так и возможностей ее преобразования. Благодарные потомки отдают им дань глубокого уважения и признания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ломоносов М.В.* Избранные труды по физике и химии. – М.: АН СССР, 1961.
2. *Carnot S.* Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a developper cette puissance. A PARIS, CHEZ BACHELIER LIBRAIRE 1824. Перевод на русский язык есть в сборнике «Второе начало термодинамики». – М.– Л.: ГТТИ, 1934.
3. *Мартыновский В.С.* Анализ действительных термодинамических циклов. – М.: Энергия, 1972.
4. *Бродянский В.М.* Перспективы использования низких температур окружающей среды в теплоэнергетике и холодильной технике// Холодильная техника. 2003.№ 8.
5. *Архаров А.М.* Возможности и проблемы криологии// Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2002. № 7.
6. *Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.* Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. *Гухман А.А.* Об основаниях термодинамики. АН Казахской ССР, 1947.
8. *Марио Льоцци.* История физики. – М.: Мир, 1970.

Поздравляем с наградой!

*Указом **ПРЕЗИДЕНТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ** от 13 декабря 2003 года присуждена **Государственная премия Российской Федерации 2002 года** в области науки и техники и присвоено **звание лауреата Государственной премии Российской Федерации** в области науки и техники **Архарову Алексею Михайловичу**, доктору технических нвук, заведующему кафедрой Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, руководителю работы, **Матвееву Валерию Александровичу**, доктору технических наук, руководителю научно-учебного комплекса, **Митрохину Владимиру Николаевичу**, доктору технических наук, профессору, **Рождествину Валерию Николаевичу**, доктору технических наук, руководителю научно-учебного комплекса, **Соленову Владимиру Ильичу**, доктору технических наук, профессору, – работникам того же университета; **Буториной Антонине Валентиновне**, доктору медицинских нвук, главному научному сотруднику Российского государственного медицинского университета; **Никитину Альберту Николаевичу**, доктору технических наук, бывшему генеральному директору ассоциации «Космонавтика – человечеству»; **Цыганову Дмитрию Игоревичу**, доктору технических наук, заместителю директора открытого акционерного общества «Московский комитет по науке и технологиям», – **за создание медицинской криогенно-сверхвысокочастотной аппаратуры и разработку технологии ее применения в области детской хирургии.***

Горячо поздравляем лауреатов с присуждением Государственной премии и желаем дальнейших успехов в научной деятельности!