АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Серия «Наука и технический прогресс»

Основана в 1977 г.

Е. И. Янтовский

ПОТОКИ ЭНЕРГИИ И ЭКСЕРГИИ

Ответственный редактор
член-корреспондент АН СССР
А. А. МАКАРОВ



МОСКВА «НАУКА»
1988

ББК 31
Я60
УДК 620.9

Рецензенты:
доктора технических наук
Ю. И. БОКСЕРМАН,
И. Л. ВАРШАВСКИЙ

Янтовский Е. И.

Я60 Потоки энергии и эксергии.— М.: Наука, 1988.— 144 с., ил.— (Серия «Наука и технический прогресс»).
ISBN 5—02—006620—6

Книга представляет собой одну из первых в научно-популярной литературе попыток изложить научные основы энергосбережения — как вычислить коэффициент полезного использования топлива, как определить затраты энергии на различные объекты. Даются также основные сведения о современных методах расчета потоков эксергии, подробно описывается накопление эксергии солнечного излучения в соляных («солнечных») прудах.

Я $\frac{1704020000—364}{054(02)—88}$ 48-88 НП ББК 31

ISBN 5—02—006620—6 © Издательство «Наука», 1988

Илюше и Нине.

Введение

Для правильного решения социальных вопросов недостаточно одного знакомства с политическими учениями, но... нужно еще уметь правильно читать в книге природы.

...Нельзя утилизировать полностью рассеянную энергию: это значит, что она обесценивается или вырождается процессами природы. Процессы, возникающие вместо исчезнувших, обладают меньшей работоспособностью, их свободная энергия меньше. Причина необратимости процессов природы и обесценивания энергии заключается в том, что крупные и интенсивные движения размениваются на более мелкие и медленные, переходящие постепенно в незримо малые, хаотические, неупорядоченные, нестройные движения частиц материи. Конечный результат всех процессов мертвой природы — увеличение нестройности или, как говорят, рост энтропии.

Н. А. Умов, 1906 г.

О пользе непонятных названий можно спорить. Кого-то они отталкивают, а кого-то привлекают. С помощью названия данной книги автор надеялся возбудить у ее возможных читателей интерес к вопросам энергетики и энергосбережения.

«Энергосбережение, экономия энергии, производство энергии» — как часто мы слышим и читаем эти слова. Но позвольте, может сказать любой старшеклассник, нам вчера в школе говорили, что энергия всегда сохраняется, есть даже закон такой — основной закон природы. Зачем же беречь энергию, если сама природа так хорошо это делает? И как можно энергию где-то добывать и производить?

Эти естественные вопросы совсем не так наивны, как может показаться на первый взгляд. Чтобы дать на них ответ любознательному читателю, придется напомнить некоторые основы физики и ее важной и интересной части — термодинамики, рассказать, как энергия перемещается в пространстве, как поток энергии теряет способность производить работу при переходе от одного энер-

гоносителя к другому и как затраченная ранее энергия позволяет получать новые потоки энергии. Именно здесь оказывается полезным понятие «эксергия». Желательно также заранее прочитать книги, где популярно изложены основы термодинамики *. В настоящей книге используются понятия и уравнения из неравновесной термодинамики — области современной физики, посвященной потокам энергии. Автор попытался их упростить и конкретизировать с помощью примеров, известных из повседневной практики или популярной литературы. Для иллюстрации также взяты примеры, касающиеся современных проблем энергетики.

Научно-технический прогресс в энергетике многолик: электроэнергию и теплоту можно получить из различных источников — как традиционных, так и новых. Потребителю безразлично, откуда энергия берется. Небезразлично это лишь для страны в целом, поскольку ее энергетический комплекс потребляет уже около половины всех капиталовложений в промышленность и «идти» за энергией приходится все дальше на восток и север.

В современных условиях приобретает особую важность правильный выбор источников энергии в конкретном месте и в конкретное время. Где и когда строить атомные электростанции, гидростанции или тепловые электростанции на угле? Обеспечивать теплоснабжение от котельных, теплоэлектроцентралей или теплонасосных станций? Какую проводить реконструкцию электростанции? Такие вопросы регулярно возникают перед плановыми и проектными организациями и энергосистемами.

Каков же критерий выбора лучшего варианта энергоснабжения? Сегодня он однозначен — приведенные денежные затраты на получение электроэнергии или теплоты. Чем ниже эти затраты, тем вариант лучше. Разумеется, тут нужно учитывать и влияние на окружающую среду, т. е. затраты на очистные сооружения.

Минимум приведенных денежных затрат и есть тот компас, который сейчас указывает путь развития энергетики.

Однако компас этот ненадежен. Его стрелка лихорадочно дрожит от конъюнктурных случайностей или споров о ценах. Типичный пример — толщина стен наших зданий и их теплозащитные свойства. При заниженной цене на теплоту для отопления толщина стен по расчетам на минимум приведенных затрат получалась низкой, поэтому в нашей стране, и в частности в Москве, появились здания с тонкими стенами и обилием стекла. Исчислялась экономия строительных материалов, выплачивались премии. Однако это иллюзорная экономия — она многократно перекрывается перерасходом на добычу и доставку топлива и строительство теплоисточников. Недаром в странах со сходными с нашими климатическими условиями нормативы на толщину стен много выше наших. Так погрешность единственного критерия — приведенных затрат — обусловила очевидно неверное техническое решение в строительстве.

Другой пример — реконструкция действующих энергетических предприятий, которую нужно обосновывать экономически. Какие цены на топливо здесь применять? Тарифы, по которым делают расчеты сами предприятия, или «замыкающие затраты», которые в ходу у проектных организаций? Различаются они не на несколько процентов, а в 3—4 раза. Почти такое же различие будет и в приведенных затратах. Здесь стрелка «компаса» не просто дрожит, а колеблется с большим размахом.

Защитники только денежных критериев обычно говорят: если цены назначены правильно, то и решения будут правильными. Но ведь в этом-то и весь вопрос: есть ли возможность сейчас исключить ошибки в ценах, особенно в современных условиях, когда радикально меняется хозяйственный механизм страны?

Поэтому, естественно, возник и уже довольно давно обсуждается вопрос, могут ли денежные затраты быть единственным критерием в энергетике. А если нет, то чем их дополнить? Ведь неверный выбор критерия для энергетических объектов, строительство которых требует колоссальных затрат, может привести к тому, что энергетический комплекс будет все больше энергии потреблять сам на себя (или — попросту — станет самоедом). Денежные расчеты без дополнительных критериев в принципе не могут предотвратить этого.

Здесь на помощь экономике и энергетике должна прийти физика. Ее законы достаточно стабильны и не подвластны конъюнктурным случайностям. Один из методов выбора вариантов в энергетике по физическому критерию эффективности получил название «энергия-нетто». Определяется минимум не денежных затрат, а затрат

* См., например: *Смородинский Я. А.* Температура. М.: Наука, 1981. (Б-ка «Квант»; Вып. 12); *Волькенштейн М. В.* Энтропия и информация. М.: Наука, 1986; *Фен Дж.* Машины, энергия, энтропия. М.: Мир, 1986.

энергии на единицу выданной электроэнергии или теплоты. Для этого надо рассчитать все энергетические затраты. Не только текущие — скажем, подачу угля на электростанцию, но и прошлые — затраты на строительство самой электростанции, ее оборудование, создание материалов (начиная от добычи руды в недрах), сооружение шахты, железной дороги и электровоза.

Чем меньше затраты энергии на единицу выданной энергии, тем вариант лучше. Иными словами, чем больше энергии-нетто выдает вариант энергоснабжения, тем он лучше. Энергией-нетто здесь называется выданная за нормативный срок энергия за вычетом ее затрат на создание и обслуживание объекта.

Если на минимум затрат энергии планировать весь энергетический комплекс, то планирование по другим критериям (в том числе и на минимум денежных затрат) приведет к огромному перерасходу энергии. Оправдан ли этот перерасход энергии экономией в деньгах, которая ему соответствует? Не лучше ли принимать промежуточные решения, допуская одновременно и уменьшенный перерасход энергии, и некоторый перерасход денежных средств? Ведь экономия денежных затрат за счет перерасхода энергии в текущем пятилетии обернется в следующей пятилетке и перерасходом капиталовложений на добычу истощающихся энергоресурсов.

Непригодность только денежных критериев становится очевидной при рассмотрении новых источников энергии в перспективе нескольких десятилетий, если и сегодняшние цены плохо обоснованы и вызывают споры. В то же время затраты энергии на создание электростанций будущего, которые главным образом определяются затратами на материалы для оборудования, поддаются расчету с неплохой точностью. Как свидетельствует статистика, энергоемкость материалов снижается за счет технического прогресса в металлургии и химии и растет из-за обеднения сырья. В целом она сравнительно стабильна в последние десятилетия и прогнозируется значительно точнее, чем цены.

Очевидно, бессмысленны электростанции такого типа, на создание которых уйдет больше электроэнергий, чем они выдадут за весь свой срок службы. А между тем некоторые из нетрадиционных схем электростанций именно таковы.

Особенно трудно получить энергию-нетто от возобновляемых источников энергии (солнечных, ветровых, геотермальных, океанических электростанций). Причина — в низкой плотности природного потока энергии. Из-за низкой плотности получаются огромные размеры необходимого оборудования и чрезмерные затраты энергии на его создание (прошлые затраты). Разумеется, это не должно останавливать поиски путей увеличения масштабов использования возобновляемых источников, но критерий энергии-нетто должен стать для них основным.

Важность проведения расчетов энергии-нетто можно также проиллюстрировать на гипотетическом примере, когда тепловая электростанция и угольная шахта находятся поблизости и обслуживают друг друга. Из-за увеличения глубины добычи и снижения толщины пласта (при большом диаметре фрезы угольного комбайна) затраты электроэнергии увеличиваются настолько, что весь добытый уголь сжигается на станции, а вся электроэнергия потребляется шахтой и поселками шахтеров и энергетиков. Здесь получается нулевая энергия-нетто, но не за счет прошлых затрат, как в случае возобновляемых источников, а за счет непредусмотренного увеличения текущих затрат энергии.

Оценки эффективности по денежным критериям не позволяют выявить такого положения, так как все внешние признаки активной деятельности здесь налицо, взаимные денежные расчеты производятся аккуратно и зарплату получают все.

Задача переноса центра тяжести с нового строительства на реконструкцию, с увеличения добычи ресурсов на их всемерную экономию применительно к энергетике обусловлена также и тем, что это выгоднее по критерию энергии-нетто, т. е. заданный прирост производства энергии потребует меньших ее затрат при реконструкции, чем при новом строительстве. Это решение, бесспорно, правильное и своевременное. Но после его принятия возникают вопросы о том, с чего начинать, какие предприятия реконструировать и в каком порядке. Применительно к энергетике можно дать рекомендацию — те, где энергия-нетто при реконструкции будет выше.

Практика подобных расчетов показала, что они достаточно просты и их результаты ясны. Они способны дополнить и уточнить методы расчетов по денежным затратам и выявить энергетические объекты с нулевой энергией-нетто. Читать о методах расчетов без примеров самих расчетов неинтересно, поэтому в книге даются простейшие расчеты новых энергетических установок. В некоторых

странах уже более 10 лет действуют законодательные акты, согласно которым новые энергетические проекты не принимаются к рассмотрению, если не сделаны расчеты, показывающие, что реализация проектов даст больше энергии, чем будет затрачено на саму реализацию.

К этому можно добавить, что значимость понятий «энергия-нетто» и «эксергия» выходит за пределы упомянутых расчетов. Они заслуживают введения в арсенал управления всеми отраслями народного хозяйства, где требуется рациональное использование энергии. Знакомство с этими понятиями представляется особенно необходимым в связи с коренной реконструкцией топливно-энергетического комплекса, применением энергосберегающих технологий и намеченным снижением энергоемкости национального дохода в 1,4 раза к концу века.

Автор стремился сделать книгу интересной и для школьников, и для студентов, и для инженеров. В ней есть места разной степени трудности. Главное, чтобы читатель с помощью приведенных примеров смог сопоставить абстрактные физические понятия с реальными объектами, которые встречаются в энергетике и технологии.

Особенно важно понятие потока эксергии для энергетики, для всего топливно-энергетического комплекса. Начинаются потоки эксергии в нефтяной или газовой скважине или угольной шахте, а кончаются там, где носитель энергии приходит в равновесие с окружающей средой: свет от электрической лампочки не только освещает, но и нагревает окружающие предметы, но нагрев этот слаб и их температура практически совпадает с температурой окружающей среды. Если отвлечься от их химического состава и рассматривать только физическую эксергию, то в этих предметах эксергии уже нет — можно считать, что ее поток закончился.

Попробуем проследить за потоками энергии и эксергии от их начала и до конца.

Глава 1. Теорема Умова

Что такое поэзия? Этого я не знаю. Но если бы я и знал, что такое поэзия... то не сумел бы выразить своего знания или, наконец, даже подобрав и сложив подходящие слова, все равно никем бы не был понят. Вообще, есть реальности, которые, по-видимому, лучше вовсе не определять.

И. Анненский

Я в жизнь свою не читал такой галиматьи.

Из отзыва о докторской диссертации Н. А. Умова «Уравнения движения энергии в телах», 1874 г.

Вектор потока энергии

Что такое энергия? Этого я не знаю. Иногда пишут, что это мера интенсивности, которая подчиняется строгому закону сохранения. Может быть, энергия, как и поэзия, такая реальность, которую лучше вовсе не определять.

Однако не следует огорчаться, что какое-то понятие не удается выразить через другие, более «понятные» термины. В физике есть много таких примеров: время, пространство, электричество и другие, которые тоже ни через что иное определить нельзя. Но это и есть самые фундаментальные понятия, мы к ним привыкаем в результате неустанного употребления, а законы природы, устанавливающие связь между ними, позволяют нам вполне успешно предсказывать явления и рассчитывать машины.

Энергия как мера интенсивности никаких видов или, как иногда говорят, «форм» не имеет — она имеет только количество, но не имеет качества (в смысле видового признака). Когда мы говорим «кинетическая», «химическая», «ядерная» энергия, то имеем в виду определенный вид носителя энергии: движение тела как целого, крепость связи атомов в молекуле или связи частиц в ядре атома.

Более 100 лет назад известный русский физик Н. А. Умов предложил описывать потоки энергии с помощью вектора и записал закон сохранения энергии, пользуясь

приемами векторного анализа. По-видимому, читатели знают, что вектор указывает не только величину, но и направление в пространстве и его можно изобразить в прямоугольных координатах в виде стрелки с помощью тройки чисел, которые показывают величину проекций вектора на три оси координат.

Через 10 лет после Умова английский физик Дж. Пойнтинг написал закон сохранения энергии в электромагнитных процессах с помощью знаменитых уравнений Максвелла и ввел вектор потока энергии.

Для нас вектор Умова—Пойнтинга — вектор плотности потока энергии, обозначенный δ,— будет играть главную роль. Но речь пойдет не только о нем в целом, а и о его составляющих, которые описывают движение разных носителей энергии.

Примем за исходный пункт следующее соотношение:

$$\delta = \varphi j_q + V j_p + G j_m + T j_s. \qquad (1)$$

Размерность величины этого вектора — отношение мощности к площади, т. е. в системе СИ — Вт/м^2.

Обозначения в формуле (1) таковы:

φ — электрический потенциал. Разность его значений в двух точках — электрическое напряжение — хорошо известная из практики и легко измеряемая величина.

V — скорость движения; здесь она тоже имеет характер потенциала по отношению к механическому движению.

G — химический потенциал, называемый также функцией Гиббса; применительно к различным химическим соединениям он характеризует силу связи атомов в молекуле и приводится в справочниках для всех соединений, по величине он близок к теплоте химической реакции (например — сгорания).

T — термический потенциал, или абсолютная температура; разность температур напоминает разность электрических потенциалов — напряжение.

Как правило, все эти потенциалы — величины скалярные, не указывающие направления в пространстве. Лишь для скорости иногда приходится делать исключение и считать вектором при описании передачи энергии в твердом теле или вязкой жидкости, чего мы здесь делать не будем.

Все величины, обозначенные через $\mathbf{j}$ с индексами q, p, m, s — векторы плотности потока носителя энергии.

j_q — плотность электрического тока. Если он равномерно распределен по сечению F проводника, то полный

ток $I = j_q F$. Электрический ток — поток электрических зарядов (сумма зарядов каждого знака, умноженная на их коллективную скорость). Что такое эти заряды, никто сказать не может, но все хорошо знают, что они притягиваются друг к другу или отталкиваются и что в магнитном поле их движение искривляется. Силы их взаимодействия легко вычислить, что для практики вполне достаточно.

Произведение φj_q и есть плотность потока электроэнергии.

j_p — плотность потока импульса. Раньше импульс называли количеством движения, что было более образным названием. Он тоже наряду с энергией характеризует интенсивность движения и подчиняется закону сохранения (второму закону механики Ньютона).

Поток импульса отличается от импульса тем же, чем поток зарядов от самого заряда или поток энергии от энергии. Поток характеризует перенос какой-то величины в пространстве. Плотность потока — поток через единичную площадку, например 1 м^2 или 1 см^2. Это вполне понятно, когда речь идет об электрическом заряде или веществе, но несколько необычно, когда рассматривается поток импульса. Главной его частью, самой существенной для нас, является давление в жидкости или газе, поэтому мы запишем поток импульса в виде суммы статического и динамического давлений:

$$j_p = p + \rho \frac{V^2}{2} = \rho \left(\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \right).$$

Это — упрощенная запись, справедливая только тогда, когда при передаче энергии можно пренебречь механическими касательными напряжениями.

Статическое давление p чувствует прибор, датчик которого движется вместе с потоком жидкости или газа, а динамическое давление $\rho \frac{V^2}{2}$ чувствует заторможенный датчик при сравнении с движущимся. На практике динамическое давление $\rho \frac{V^2}{2}$ определяют как разность $j_p - p$, а по нему вычисляют скорость V.

Произведение $V j_p$ — плотность потока механической энергии (мощности), который за определенное время производит определенную работу, измеряемую произведением силы на путь точки ее приложения. Понятие хорошо известно из школьного курса физики. Поэтому в дальнейшем, когда мы будем говорить о способности

производить работу, будем иметь в виду способност передачи энергии от других носителей (главным образом от потока термического заряда) к потоку импульса.

Передача энергии через приводной ремень от мотора к станку или через вращающийся вал от турбины к генера тору как раз и происходит через поток импульса. Но здес надо предупредить, что направления вектора δ и силы или скорости при передаче вращаемым валом не совпада ют: скорость и сила перпендикулярны оси вала, а поток энергии идет вдоль оси. Здесь скорость надо считать вектором, а потоку импульса приписать свойства тензора Это трудное понятие мы рассматривать не будем, так как принятая запись j_p для этого случая не годится.

За пределами нашей беседы останутся и волновые дви жения, в том числе и передача энергии электромагнит ными волнами. Здесь тоже правомерно понятие потока импульса, переносящего энергию.

Наконец, j_s — наиболее важное для дальнейшего по нятие — плотность потока термического заряда, который имеет специальное название «энтропия».

Когда мы говорим о потоке электрических зарядов j_q, то имеем в виду движение конкретных материальных носителей электрических зарядов — электронов, которые либо путешествуют сами, либо совместно с другими, более крупными частицами, которые без электрона были нейтральны (отрицательные ионы). Носителем положительного заряда также могут быть ионы, полученные удалением электронов из нейтральной частицы.

Но у термического заряда никаких материальных носителей нет. На самом деле энтропия — это умноженный на константу логарифм числа, которое показывает, сколько различных состояний (например, в расположении частиц) может иметь рассматриваемый физический объект. Понятие энтропии применимо только тогда, когда есть неопределенность с очень большим числом возможных состояний. Тогда с его помощью статистическая физика позволяет увидеть в полном хаосе строгий порядок и установить основные законы природы.

Выдающийся австрийский физик Людвиг Больцман первым понял, что энтропия как термический заряд и как число возможных состояний — это одно и то же.

Здесь хотелось бы отметить, что в истории физики, может быть, самыми впечатляющими были открытия того, что два, казалось бы, совершенно разных физических объекта — это одно и то же, например свет и радиоволны,

масса как мера притяжения к Земле и как мера центробежной силы и др.

Если поток энтропии однороден, т. е. равномерно распределен по сечению, то в единицу времени $\dot{S} = j_s F$, а полный поток тепла $\dot{Q} = \dot{S}T$. Изменение энтропии за время τ можно определить как $\Delta S = \dot{S}\tau$.

Радикальное отличие j_s от других потоков состоит в следующем. И электрический заряд, и импульс, и вещество подчиняются, подобно энергии, строгим законам сохранения: в изолированном объеме они не исчезают и не появляются — это запрещено законами сохранения заряда, вещества и импульса. Поэтому их появление внутри объема или исчезновение из него возможны, только если есть потоки через поверхность, ограничивающую систему, т. е. если объем не изолирован. Это можно записать в виде уравнения

$$\partial\rho/\partial t + \operatorname{div}\mathbf{j} = 0. \qquad (2)$$

Здесь ρ — плотность заряда, импульса или массы. Символ $\partial/\partial t$ обозначает скорость изменения ρ со временем. Символ div, относящийся к вектору $\mathbf{j}$, обозначает сумму производных от компонент вектора по координатам (отношение потока этого вектора через замкнутую поверхность к величине объема, который находится внутри поверхности):

$$\operatorname{div}\mathbf{j} = \partial j_x/\partial x + \partial j_y/\partial y + \partial j_z/\partial z.$$

Теперь можно показать, чем j_s отличается от остальных потоков: он не подчиняется закону сохранения. Термический заряд в отличие от электрического может рождаться. Более того, специальный закон природы, имеющий такую же силу, как и закон сохранения энергии, гласит: в изолированной системе при любых движениях энтропия возрастает. Эти два закона (сохранения энергии и возрастания энтропии) называют первым и вторым законами термодинамики.

Конечно, надо помнить, что первый закон справедлив всегда, а второй — только тогда, когда имеет смысл понятие «энтропия», т. е. в таких явлениях, где имеется достаточно много частиц и много неопределенных возможных состояний. Практически все явления, которые мы можем наблюдать на Земле, именно таковы *.

---

* Подробнее об этом см.: *Биберман Л. М.* Второй закон термодинамики и энергетика // Энергия. 1984. № 1.

В отличие от выражения (2) для j_s имеется новый член в правой части, там, где в (2) был нуль,— это σ_s интенсивность рождения энтропии:

$$\partial\rho_s/\partial t + \mathrm{div} j_s = \sigma_s. \quad (3)$$

Величина σ_s играет очень важную роль в той ветви термодинамики, которая рассматривает не состояния равновесия, а процессы перехода к ним и называется неравновесной термодинамикой или термодинамикой необратимых процессов. В существовании $\sigma_s > 0$ состоит одна из общих формулировок второго закона.

Для полного потока энергии, включающего все четыре слагаемых (1), можно записать закон сохранения энергии (первый закон термодинамики) в виде

$$\partial(\rho w)/\partial t + \mathrm{div}\delta = 0. \quad (4)$$

Это и есть теорема Умова о потоках энергии.

Воздавая должное Р. Майеру, Д. Джоулю и Г. Гельмгольцу, справедливо считающимися авторами закона сохранения энергии, мы не должны забывать, что в том точном математическом выражении, каким сегодня описываются все законы сохранения, сохранение энергии описал именно Н. А. Умов в 1874 г. Поэтому у нас есть все основания считать его соавтором этого закона.

Если плотность энергии w равномерно распределена в объеме, то можно умножить оба слагаемых (4) на этот объем и получить

$$\partial E/\partial t + \dot{w}F = 0, \quad (5)$$

т. е. скорость накопления или уменьшения энергии в замкнутом объеме равна потоку энергии $\dot{w}$ через его поверхность F.

Энергию можно связать с некоторыми другими измеримыми величинами или по крайней мере разделить на части, соответствующие разным носителям энергии:

$$\rho w = \rho U + \rho\frac{V^2}{2} + \rho G + \rho g z + \varepsilon\frac{E^2}{2} + \mu\frac{H^2}{2}.$$

Здесь U — энергия теплового хаотического движения частиц в газе или жидкости, называемая внутренней энергией; g — ускорение свободного падения; z — высота подъема; $\rho\frac{V^2}{2}$ — энергия движения тела, называемая кинетической; G — химический потенциал (уже знакомый нам); E и H — напряженность электрического и магнитного полей; ε, μ — диэлектрическая и магнитная постоянные, а $\varepsilon\frac{E^2}{2} + \mu\frac{H^2}{2}$ — электромагнитная энергия.

Если объект стационарный и его свойства не изменяются со временем, то $\partial/\partial t = 0$ от всех величин, в том числе и от энергии, т. е. $\partial E/\partial t = 0$. В этом случае через замкнутую поверхность сколько энергии втекает, столько же и вытекает, так что поток энергии похож на поток несжимаемой жидкости.

Новизна подхода Умова была причиной отзыва, полученного им 115 лет назад на свою диссертацию. К счастью, на судьбу Умова и его открытия он радикально не повлиял. Николай Алексеевич Умов стал профессором Московского университета, его работы высоко оценивали Кельвин и другие физики.

Прогноз Умова

Исключительная прозорливость Н. А. Умова и его забота об отыскании верных путей развития человечества видны из его статьи, написанной в 1912 г. Приведем из нее выдержки.

«Потребная человеку мощность составляет около 2300 миллиардов сило-часов, из коих 20% идет на механическую силу, 40% — на отопление и столько же на металлургические и другие промышленные процессы, ничтожная доля — на световую энергию. Распределение потребления мощности дает иную картину, чем распределение потребления угля, именно из 1250 миллионов тонн угля, потребленных в 1910 г., 50% пошло на производство силы, 30% — на отопление, около 20% — на металлургические и другие промышленные цели, около 3% — на производство света... при производстве силы излишне тратится 600 миллионов тонн угля, в отоплении — 150 миллионов и при освещении — 35 миллионов. Всего излишне тратится 1050 миллионов, т. е. 80% от всего количества... Отсюда вытекает особая важность и настоятельность поднятия полезного действия тепловых двигателей.

Мощность водяных сил земного шара может быть определена ежегодно в 1—2 биллиона лошадиных сило-часов, следовательно, приблизительно втрое более современной потребности в механической энергии; но она составляет только половину всего количества энергии, потребляемой на Земле. Таким образом, этот источник не может

быть достаточным для поддержания и развития совр
менной культуры.

Мысль должна обратиться к новым исканиям. Мы н
можем принимать во внимание неправильно проявля
щиеся мощности в форме, например, энергии ветра и мо
ских волн, хотя последние при сильных волнениях мог
развивать несколько сотен тысяч лошадиных сил н
километр береговых линий. Благоприятнее обстоит дел
с использованием прилива и отлива. Приливная волн
достигает в некоторых местностях высоты от 5-ти до 10-т
метров, и представлялось бы выгодным устройство боль
ших водоемов, которые наполнялись бы водой во врем
прилива и опоражнивались бы через турбины при отливе
Пользование мощностью приливов и отливов есть в суш
ности пользование энергией вращательного движени
Земли около оси; такое пользование вызвало бы замед
ление движения и удлинение дня. Но запас этой энерги
так велик, что при ежегодном заимствовании из него в ст
раз большего количества энергии, чем потребляемо
в настоящее время на Земле, день уменьшился бы на одн
секунду только в течение десяти тысяч лет. В этом отно
шении использование энергии вращательного движени
Земли в количестве, доступном человеку, не может воз
буждать каких-либо опасений.

Все перечисленные источники энергии на Земле
в том числе и внутренняя теплота нашей планеты, пере
даваемая ее холодной поверхности и затем излучаемая
в пространство, вследствие ее малости и очень малой
превращаемости или недостаточны, или же, наконец
трудно используемы. В этом отношении они не обеспе
чивают непрерывного культурного и промышленного
развития человечества.

Нам нужно обратить наши взоры на небесное простран
ство, и здесь мы находим наше Солнце, посылающее нам
своими лучами громадные количества энергии и создаю
щее все ее земные запасы. В угле, водяной силе, в ветре
и морских волнах мы имеем дело с запасенной энергией
солнечных лучей. Мы пользуемся до сих пор этой энергией
посредственно, и такое пользование привело нас к нашим
сомнениям. Но сохранятся ли они, если мы поставим
вопрос о непосредственном использовании энергии сол
нечных лучей?

На один квадратный метр в течение часа приходится
около 1700 килограмм-калорий, что соответствует 2,6 ло
шадиным силам в час. Эта энергия уменьшается поглоще-

нием в воздухе, главным образом водяными парами и
угольной кислотой, водяными каплями, облаками, пылью
и т. д., тем больше, чем ближе подвигаемся к полюсу,
т. е. чем косвеннее направление лучей к земной поверх
ности.

Для широты в 45° эта мощность сводится приблизи
тельно к одной лошадиной силе на квадратный метр,
по крайней мере летом и в течение 9 часов ежедневно.
Если мы применим эти цифры к Сахаре, то полученные
результаты будут ниже действительных: мы найдем, что
в течение 1/3 суток Сахаре приносится солнечными лу
чами мощность в 9 биллионов лошадиных сил или, рас
пределяя ее на целые сутки, от 3 до 4 биллионов. Полагая,
что мы потребляем из них только тысячную долю,
мы имели бы 3—4 миллиарда непрерывно работающих
лошадиных сил или в течение года 30 биллионов лошади
ных сило-часов, т. е. количество, превосходящее совре
менное потребление энергии, включая в него и отопление,
в десять раз. Таким образом, Солнце есть тот источник
энергии, из которого в далеком будущем человечество
должно будет и сможет черпать необходимую для его
культурного существования и развития энергию.

Пока имеются только небольшие попытки непосред
ственного использования солнечной энергии. В Америке,
в Калифорнии и некоторых других штатах осуществлена
в небольших размерах концентрация вогнутыми зеркалами
солнечных лучей на небольшие котлы машин, работающих
парами воды или эфира. Но такие устройства не лежат на
пути ожидаемого непосредственного пользования солнеч
ной лучистой энергией. Температура Солнца превышает
5000°, и температурный интервал между Солнцем и Зем
лею настолько велик, что энергия солнечных лучей почти
целиком превращается в механическую энергию; это
свойство совершенно игнорируется теми приемами, кото
рые сводят всю задачу к нагреванию парового котла.
Можно поэтому утверждать с большой уверенностью,
что люди овладеют солнечной энергией совершенно иными
процессами, по всей вероятности, электрической природы.
В этом вопросе все еще должно быть создано, но для его
решения мы располагаем несколькими столетиями. Пред
стоят разочарования и неудачи, но стоящая перед нами
высокая цель заслуживает трудов и самоотвержения,
так как от ее достижения зависит будущее человечества
и его культуры» [1, с. 449—461].

Можно лишь удивляться, сколь современно звучат

слова Н. А. Умова, написанные три четверти века назад. Изменились лишь цифры годового потребления энергии от 1,25 млрд т в 1910 г. до примерно 10 млрд т в настоящее время. Кроме того, появился новый мощный источник энергии — ядерная энергия, о чем во времена Умова еще трудно было предполагать. Но поставленные Н. А. Умовым задачи освоения новых источников энергии, в особенности солнечной в пустынях, сегодня стали более актуальными, и мы к этой проблеме еще вернемся. Главное же его научное достижение — вектор Умова — позволяет нам сегодня рассматривать движение энергии в пространстве и ее передачу от одного носителя другому, т. е. говорить о потоках энергии.

Через несколько лет после публикации статьи Умова другой известный русский физик профессор В. А. Михельсон писал в 1920 г.: «Дешевизне минерального топлива наступил конец. Острый топливный кризис не есть явление местное и временное, но явление общее и длительное» *.

Современные энергетические прогнозы

Теперь, спустя три четверти века, мы знаем, что кроме угля есть другие источники энергии такого же масштаба — нефть, газ, ядерная энергетика [9]. Энергетические анализы и прогнозы, подобные тем, которые делал Н. А. Умов, заполнили страницы технических журналов. Прогнозы разрабатываются уже не одиночками, а большими коллективами специалистов, вооруженных мощной компьютерной техникой.

Для иллюстрации воспользуемся прогнозами самой крупной международной организации — Мировой энергетической конференции (МИРЭК) и сопоставим ее прогнозы развития энергетики мира, выполненные в 1980, 1983 и 1986 гг. На рис. 1 сплошными линиями соединены характерные точки для угля, нефти, газа и полного мирового энергопотребления [7]. Как видно из графика, с учетом мировой демографической ситуации в 1980 г. прогнозировался монотонный рост энергопотребления (а следовательно, и производства) от 9 до 22 млрд т условного топлива (т у.т.) в 2020 г. Но самой существенной деталью прогноза является прекращение роста добычи органического топлива начиная с 2000 г. Вывод мог привести к важным последствиям: поскольку новая техника для новых мощностей по добыче и использованию органического топлива станет ненужной и потребуется только возмещение и реконструкция старых мощностей, то и разработка новой техники для органического топлива практически не нужна. Имелось в виду, что к 2020 г. половина мировой потребности в энергии будет удовлетворяться за счет ядерной энергии и возобновляемых источников.

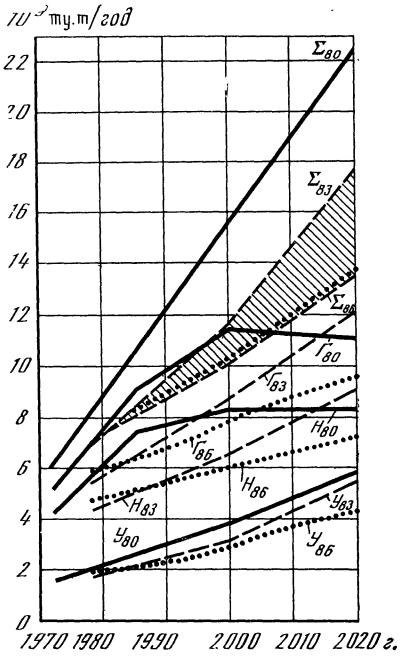


Рис. 1. Прогнозы МИРЭК мирового производства первичных энергоресурсов (У — уголь, Н — нефть, Г — газ). Сплошные линии — прогноз 1980 г., пунктир — 1983 г., точечные линии — 1986 г.

Однако всего лишь через 3 года, т. е. в 1983 г., прогноз был радикально пересмотрен, несмотря на отсутствие каких-либо изменений в демографической ситуации [8]. Прогноз 1983 г. показан на рис. 1 пунктиром. Штриховкой отмечена зона неопределенности в прогнозе полного производства энергоресурсов. Как видно из графика, по прогнозу 1983 г. ожидается монотонный рост всех источников энергии, главным образом — добычи органического топлива. Самой существенной деталью прогноза является снижение мировой потребности в энергоресурсах примерно на 30%, т. е. по уровню 2020 г. на 7 млрд т условного топлива. Для ядерной энергии и возобновляемых источников оставлено не 50%, как в прежнем прогнозе, а не более 20%, тогда как 80% мировой потребности в энергии будет давать органическое топливо.

Наконец, на последнем конгрессе МИРЭК в 1986 г. составлен прогноз, показанный точечными линиями. По суммарной потребности энергоресурсов он совпадает с нижним уровнем прошлого прогноза и подтверждает монотонный рост добычи органического топлива, а также масштаб

* *Михельсон В. А.* Проект динамического отопления. // Собр. соч. Т. 1. М., 1930. С. 321.

снижения энергопотребления в сравнении с прогноз
1980 г.

Снижение энергопотребления в таких масштабах мож
но прогнозировать уверенно. Это и есть результат раб
по энергосбережению, которые уже активно проводят
во всех развитых странах. Они привели за 10 лет (с 197
по 1983 г.) к снижению энергоемкости национального до
хода на 30—40%. Таким образом, сопоставление прогно
зов МИРЭК показывает большую роль, которая отводит
ся энергосбережению в мировой энергетике.

Прежде чем проводить термодинамические оценки про
цессов в технике и при энергосбережении, полезно сопос
тавить их с природными термодинамическими процесса
ми [10]. Ниже приводятся такие данные (в ТВт·г):

Поступление излучения от Солнца	$122 \cdot 10^3$
Нагрев воды и подъем влажного воздуха	$119 \cdot 10^3$
Испарение влаги с суши	$3 \cdot 10^3$
Ветер	350
Океанские течения	0,2
Восстановление CO_2 и H_2O в фотосинтезе	50
Окисление углеводородов	50
Инфракрасное излучение в космос	$122 \cdot 10^3$

Полное производство энергии человеком в настояще
время, согласно рис. 1, составляет 10^{10} т у. т, или 1
ТВт·г, а масштабы энергосбережения — около $2 \cdot 10^9$ т у. т
или 2 ТВт·г. Как видим, масштабы деятельности человека
уже значительно превышают энергию океанских течений.

Полное количество энергии, поступившей от Солнца,
в точности равно излученной в космос. Но энтропия по
ступающего излучения много ниже, чем уходящего, что
и обеспечивает возможность осуществления всех процес
сов на Земле со сбросом энтропии в космическое простран
ство.

Несколько примеров

Физик Эбелинг (ГДР) предложил яркий и наглядный об
раз для потока энергии во Вселенной: энергия возникает
в термоядерных процессах внутри звезд, а дальше в виде
излучения (потока фотонов) передается всем космическим
телам, включая планеты. Эбелинг назвал такой поток «фо
тонным дождем». Отраженное планетами излучение при
все более низкой температуре и увеличенной энтропии
в конечном итоге приходит в равновесие с реликтовым
(первичным) излучением, имеющим температуру всего

лишь 3 К: «фотонный дождь» падает только вниз — это
следствие второго закона термодинамики.

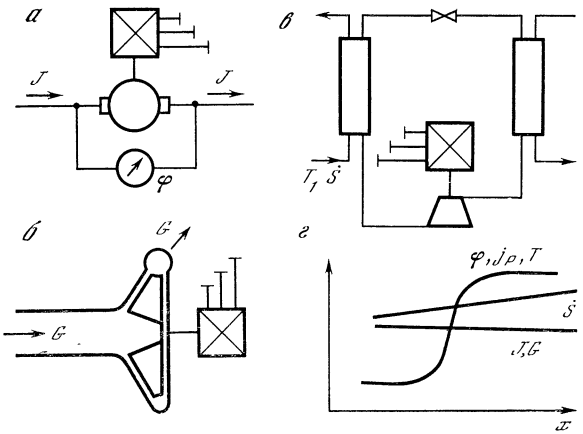
Основным природным источником энергии в наше вре
мя, как и во времена Н. А. Умова, служат вещества с боль
шим химическим потенциалом — топливо, которое не
обходимо добыть и доставить к месту передачи другим но
сителям, создавая поток j_m, затем энергия передается по
току энтропии в топке котла j_s, затем потоку импульса
в турбине и с потоком импульса через вал электрогенера
тору, который подает поток электрических зарядов j_q
в линию электропередач и далее потребителю.

Интересно проследить за изменением величины вектора
Умова, т. е. плотности потока энергии (Вт/м^2), на примере
тепловой электростанции, получающей топливо — природ
ный газ — из магистрального газопровода: магистраль
ный газопровод — $Gj_м = 5 \cdot 10^{10}$, топочная камера —
$Tj_s = 10^7$, хвостовая часть котла — $Tj_s = 10^4$, паровая
турбина (активная) — $^1/_2 \rho V^3 = 10^8$, высоковольтная ли
ния — $\varphi j_q = 10^{12}$. Паровые котлы электростанций име
ют такие большие размеры (как 20-этажный дом), потому
что в их хвостовых частях движутся уже слабонагретые
газы и плотность потока теплоты очень мала.

Цифры показывают, что в системе тепловая электро
станция — линия электропередачи происходит колоссаль
ная концентрация потока энергии — примерно в сто мил
лионов раз. Так возрастает вектор Умова при переходе
энергии от хвостовой поверхности котла к высоковольтной
линии.

Рассмотрим схемы (рис. 2) трех различных устройств:
а) электрической машины — генератора постоянного то
ка, б) водяного насоса, в) парокомпрессионного теплово
го насоса.

В схеме а) к генератору слева по проводнику притека
ет поток зарядов — электрический ток I, затем в самом
генераторе заряды продвигаются против электрического
поля, на что затрачивается мощность приводного двига
теля. Заметим, что в любом электрогенераторе продвигать
заряды против действия электрического поля нужно за
счет какой-то другой силы, называемой сторонней элек
тродвижущей силой (ЭДС). Продвигаемые заряды попада
ют в зону все более высокого напряжения, т. е. приобре
тают высокий потенциал φ, с которым и выходят из гене
ратора справа. Ток I слева и справа одинаковый, а потен
циал справа много выше, чем слева. Мы обычно говорим,
что генератор подал в сеть поток электроэнергии — поток



Р и с. 2. Изменение потенциалов и потоков в различных устройствах

а — генератор постоянного тока, *б* — гидравлический насос, *в* — тепловой насос, *г* — график изменения величин

зарядов $j_q F$, умноженный на приобретенный потенциал φ.

В схеме б) поток воды притекает слева к насосу, в котором давление увеличивается — растет поток импульса, сообщаемый воде лопатками насоса. Но вместе с импульсом растет и поток энергии. Расход воды G слева и справа от насоса одинаковый, но поток энергии справа выше. Мы об этом говорим, что насос передал воде гидравлическую мощность (энергия в единицу времени). Но здесь потенциал (скорость V) практически не изменяется, а мощность FVj_p в жидкости растет только за счет силового воздействия лопаток насоса.

В схеме в) — тепловом насосе — несколько отдельных элементов, включенных в замкнутый герметичный контур, заполненный очень легко (т. е. при низкой температуре) закипающей жидкостью, например фреоном. Обычно фреоны нумеруются — их довольно много и температура их кипения может быть различной. Элементы контура таковы: два теплообменника — испаритель (слева) и конденсатор (справа), компрессор с электродвигателем и гидравлическое сопротивление, т. е. небольшое отверстие для жидкого фреона (дроссель).

Это устройство в точности такое же, как домашний холодильник, у которого испаритель — морозильная камера с отдельной дверкой вверху, а конденсатор — труб-

ка на тыльной стороне, приставленной к стене. Но тепловой насос не холодильник, он предназначен для отопления. Слева к его испарителю подводится поток энергии в виде низкопотенциального, т. е. низкотемпературного, тепла. В испарителе это тепло воспринимается закипающим при температуре T_1 фреоном. Его пары сжимает компрессор, при этом температура повышается до T_2 и сжатые пары попадают в конденсатор. Здесь пар становится жидкостью, а теплота конденсации поступает в поток воды, идущий далее в систему отопления здания. Жидкость после конденсации имеет высокое давление, но при проходе ее через дроссель давление снижается и температура тоже до величины несколько ниже, чем T_1, затем она попадает в испаритель, и все повторяется.

Слева в тепловой насос через испаритель фактически поступает поток энтропии с низким потенциалом (T_1 около 280K), а выходит с более высоким (T_2 около 350K, и поэтому поток теплоты приобретает полезное свойство — может отапливать дом. В то же время никакие по величине потоки низкотемпературной теплоты для отопления непригодны. Именно здесь, в тепловом насосе, один из примеров проявления сходства разности температур с электрическим напряжением, т. е. сходства между термическим и электрическим потенциалами. Иногда тепловой насос называют трансформатором теплоты или термотрансформатором, имея в виду упомянутое сходство.

Попробуем теперь изобразить эволюцию рассмотренных трех потоков энергии графически. Пусть x — координата в нашем обычном пространстве вдоль потока энергоносителя. По оси ординат отложим изменения потенциалов. В схеме а) происходит увеличение потенциала в потоке, проходящем рассматриваемые устройства. В схеме б) не потенциал, а поток носителя — импульса на выходе больше, чем на входе. В схеме в) растет и потенциал T, и поток носителя — энтропии в используемом потоке энергии.

Каждое из трех устройств можно рассмотреть как термодинамическую систему, т. е. окружить воображаемой границей — замкнутой поверхностью, и подсчитать потоки энергии, пересекающие границу. Поскольку все устройства работают стационарно и от времени никакие величины не зависят, энергия нигде не накапливается, так что согласно равенству (5) сколько энергии втекает, столько же и вытекает.

Во всех случаях втекают два потока — поток носителя (слева) и поток электроэнергии к приводному двигателю,

вращающему электрогенератор, гидравлический насос и
компрессор теплового насоса. Вытекают тоже два потока
тот, для которого предназначено устройство, и теплота, в
званная рождением энтропии. Поэтому можно говорить
одинаковой структуре потоков энергии во всех трех пр
мерах. Появление на выходе потока теплоты за счет умен
шения целевого потока энергии — это явление нежел
тельное, обычно называемое «потерями энергии» или пре
то «потерями». На самом деле, конечно, никаких поте
энергии в силу первого закона быть не может. Здесь не
бежно рождение энтропии при передаче энерги
от приводного двигателя привело к преобразовани
части энергии в теплоту, отчего целевой поток энерги
уменьшился, но его сумма с потоком теплоты сохранила
неизменной. Отличительной особенностью всех трех пр
меров было то, что не менялся и носитель энергии, а смы
устройства состоял в увеличении потока переносимой и
энергии на выходе.

Нежелательные потоки теплоты — потери — могу
быть относительно малы или велики. Как же определит
насколько велика в потоке энергии ее превратимая част
А если рассматривается природный поток энтропии, скол
ко энергии можно от него передать другим носителям? В
это обычные вопросы для той части термодинамики, кот
рую называют «технической термодинамикой», посвящен
ной теории тепловых двигателей. На них мы ответим в сле
дующей главе.

Глава 2. Эксергия

Я верю в бога и Гиббса.
А. Эйнштейн

История с воздушным шариком

В морозный зимний день вы купили на улице воздушный шарик и вошли с ним в теплую комнату. Присмотритесь внимательно: по мере нагревания в шарике воздуха его размер начнет увеличиваться, а когда температура внутри шара сравняется с комнатной, рост его объема прекратится (разумеется, шарик должен быть хорошо завязан, чтобы за время наблюдения воздух из него не вытекал, т. е. чтобы масса воздуха внутри шара была постоянной).

Рост объема шара, т. е. расширение в нем газа, называется в термодинамике «процессом» между исходным (холодным) и конечным (нагретым) состоянием воздуха внутри шара. Термодинамика позволяет установить связь между этими состояниями, когда шар находился в равновесии с окружающим воздухом сначала на улице, потом в комнате. Воздух внутри шара — это огромное число молекул азота, кислорода и других газов, находящихся в хаотическом (тепловом) движении. Энергия хаотического движения всех молекул, пропорциональная температуре, и есть (уже упоминавшаяся) внутренняя энергия. Давление воздуха на резиновую пленку внутри шара — это результат ударов молекул. Оно растет с ростом температуры и растягивает оболочку шара. Сила натяжения оболочки повышается с ростом размера шара, она уравновешивает внутреннее давление. Растягивая оболочку, воздух совершает работу $A = N\Delta F$ (где N — натяжение пленки, сила на единицу длины, ΔF — увеличение поверхности пленки). Можно ли вычислить величину A?

Согласно первому закону термодинамики изменение внутренней энергии ΔU равно притоку теплоты Q минус работа расширения воздуха. Эта работа состоит не только в растяжении пленки — оболочки шара, но и в вытеснении части воздуха объемом ΔV из комнаты наружу: раз шарик стал больше, значит, для окружающего воздуха с давле-

нием p_0 места осталось меньше и его надо отодвинуть:

$$\Delta U = Q - (A + p_0 \Delta V). \quad (6$$

Если бы мы нагревали воздух внутри шарика где-нибуд в космосе, где нет атмосферы, то работа расширения о определялась бы только натяжением пленки. Но в наше случае, как и во всех задачах энергетической практик вокруг объекта есть окружающая среда, и это накладыва ет очень важное ограничение на способность получени работы из потока тепла.

Изменение объема шара ΔV такое же, как и для вытес няемого воздуха. Приток тепла к воздуху внутри шара как мы уже знаем, можно записать в виде $Q = T_0 \Delta S_0$, гд ΔS_0 — изменение энтропии воздуха в комнате.

Кроме притока энтропии ΔS_0 из комнаты, есть еще при рост энтропии внутри шара, так что ΔS больше, чем ΔS_0

Из равенства (6) с подстановкой $T_0 \Delta S$ получаем:

$$-A = \Delta U + p_0 \Delta V - T_0 \Delta S = \Delta (U + p_0 V - T_0 S). \quad (7$$

Если предположить, что шар абсолютно жесткий, т. е. плен ка нерастяжима, то никакая работа не производится ($A = 0$). В результате любых процессов энтропия может толь ко возрастать, а функция, стоящая в скобках (7), буде только убывать, и в равновесии она достигнет минимума

Определение понятия «эксергия»

Упоминание об этой новой важной функции впервы появилось в 1873 г. в трудах классика естествознания Дж. Гиббса, а затем почти столетие спустя она была вве дена советскими физиками Л. Д. Ландау и Е. М. Лившицем.

«Если мы хотим выразить в одном уравнении необхо димое и достаточное условие термодинамического рав новесия вещества, когда оно окружено средой с постоян ным давлением p_0 и температурой T_0, можно записать это уравнение в форме

$$\Delta (U + p_0 V - T_0 S) = 0, \quad (8)$$

где Δ обозначает вариацию, являющуюся результатом лю бых изменений в состоянии частей тела.

Условие устойчивого равновесия сводится к тому, что

значение выражения в скобках должно быть минималь ным». Так писал Дж. Гиббс *.

В курсе Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшица в § 20 «Макси мальная работа, производимая телом, находящимся во внешней среде» говорится: «Пусть тело находится во внеш ней среде, причем температура T_0 и давление p_0 среды от личны от температуры T и давления p тела. Тело может совершать работу над некоторым объектом, который пред полагается теплоизолированным как от среды, так и от дан ного тела. Среда вместе с находящимся в ней телом и объ ектом работы образует замкнутую систему. Среда обладает настолько большим объемом и энергией, что изменение этих величин в результате происходящих с телом процес сов не приводит к сколько-нибудь заметному изменению температуры и давления среды, которые можно, следовательно, считать постоянными...

Полное изменение энергии тела ΔU при изменении его состояния складывается из трех частей: из произведенной над телом работы внешнего источника A, из работы, произведенной средой, и из полученного от среды тепла:

$$\Delta U = A + p_0 \Delta V_0 - T_0 \Delta S_0.$$

Поскольку объем среды вместе с телом остается неизменным, то $\Delta V_0 = -\Delta V$. Далее в силу закона возрастания энтропии имеем $\Delta S + \Delta S_0 \geqslant 0$ (энтропия теплоизолированного источника работы вообще не меняется), так что $\Delta S_0 \geqslant -\Delta S$.

Поэтому

$$A \geqslant \Delta U - T_0 \Delta S + p_0 \Delta V, \quad (9)$$

$$A_{\max} = -\Delta (U + p_0 V - T_0 S). \quad (10)$$

Предположим теперь, что находящееся во внешней среде тело предоставлено самому себе и над ним не производится никакой работы. В этом теле будут происходить самопроизвольные необратимые процессы, приводящие его в равновесие. В неравенстве (9) надо теперь положить $A = 0$, поэтому будет

$$\Delta (U + p_0 V - T_0 S) \leqslant 0.$$

Это значит, что в результате происходящих с телом процессов величина $U + p_0 V - T_0 S$ будет убывать, так что

---

* См.: *Гиббс Дж. В.* Термодинамические работы. М.; Л.: ГИТТЛ, 1950. С. 80.

в равновесии она достигнет минимума»*. Таким образо
поясняется происхождение соотношения (8), данно
Гиббсом.

Введенную, следуя Гиббсу, функцию авторы никак
назвали. Во многих работах, где она использовалась,
именовали «техническая работоспособность» или прос
«работоспособность», а с 1956 г. за ней установилось н
звание «эксергия», ставшее уже общепринятым. Написа
ная только для замкнутой системы с непроницаемыми гр
ницами («тело во внешней среде»), она затем была обобщ
на и на проточные системы, в том числе и с химическим
реакциями; ее аналитическое выражение для проточны
систем несколько отличается от приведенного. Функци
стала единой универсальной мерой полезности энерги
в последние десятилетия ей посвящена обширная литера
тура [2—6]. Особо отметим работу М. М. Хазена, в кото
рой эксергетические расчеты проведены для транспортны
двигателей, в частности газотурбинного наддува теплово
ного дизеля и двухвальной турбины.

Расчет эксергии

Согласно современной трактовке эксергией термодинами
ческой системы называется максимальная работа, кото
рую система производит при обратимом переходе в состоя
ние полного равновесия с окружающей средой. Достаточ
но общим аналитическим ее выражением может служит
для газов такое равенство:

$$\varepsilon = H - T_0 S + RT_0 \Sigma x_i \ln x_i, \qquad (11$$

где H — энтальпия, R — газовая постоянная, x_i — моль
ная доля данного вещества.

Поскольку $H = U + pV$, величина разности эксер
гий для замкнутых и проточных систем $\Delta\varepsilon = (p - p_0)\, V$
Если надо учесть макроскопическое движение рабочег
тела и его потенциальную энергию в поле сил тяжести
то эксергия в единице объема для проточной системы

$$\varepsilon = H - H_0 + \rho\,(V^2/2 + gz) - T_0\,(S - S_0). \qquad (12$$

Состояние полного равновесия с окружающей средой
означает равенство всех потенциалов и отсутствие любых
потоков. Поскольку окружающая среда, вообще говоря,

* См.: *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика. М
Наука, 1964. С. 78—81.

ама по себе может быть неравновесной (если рассматрива-
тся реальные условия, окружающие энергетический объ-
кт), это понятие также нуждается в уточнениях. Обычно
од окружающей средой понимают атмосферу, воду боль-
ого водоема или земную кору. Однако иногда двигатель
аботает в ограниченном помещении и сильно влияет на
кружающую атмосферу, изменяя ее температуру и хи-
ический состав. Вода в океане может иметь настолько
ольшие разности температур, что позволяет их исполь-
овать для получения энергии. Земная кора содержит ве-
ества, находящиеся в неравновесном состоянии по отно-
ению к атмосфере (ископаемые топлива). В большинстве
учаев можно считать окружающей средой атмосферу или
лижайший водоем. И лишь в отдельных случаях, при не-
бходимости учета химических взаимодействий с окру-
ающей средой, выбор усложняется.

Эксергия тел зависит от параметров окружающей сре-
ы, которые испытывают сезонные изменения. Так, на-
ример, эксергия льда зимой близка к нулю, но летом до-
ольно велика. Чтобы получить лед летом, нужна значи-
ельная затрата работы. В то же время эксергия потока
оборотной воды в системах водоснабжения предприятий
лизка к нулю летом, но зимой приобретает существен-
ую величину и используется для нагрева вентиляцион-
ого воздуха.

В каждом конкретном расчете следует указывать, что
менно принято за окружающую среду. Среда может быть
искусственной, модельной, входящей в принятую схе-
у расчета.

В отличие от полного равновесие со средой может быть
раниченным, когда вводится в расчетную модель боль-
ой резервуар, отделенный от атмосферы тонкой по-
атливой пленкой. Температура и давление в нем такие
е, как в окружающей атмосфере, но пленка предот-
ращает смешение с нею сбросных потоков и химическое
заимодействие. Часть полной эксергии, получаемую при
раниченном равновесии, называют физической эксер-
ией. Подобно этому эксергию при учете полного равно-
есия называют химической эксергией.

Понятно, что физическую эксергию тела составляют
о кинетическая и потенциальная энергии (полностью)
люс часть внутренней энергии (если $T > T_0$). Для про-
очных систем место внутренней энергии занимает энталь-
ия.

Скорость в расчете кинетической энергии и высота подъ-

ема в потенциальной берутся относительно поверхнос земли. Для циклических процессов в замкнутом конту обычно достаточно только простой формы записи фи ческой эксергии:

$$\varepsilon\,(T,\ p) = H\,(T,\ p) - H_0 - T_0\,[S\,(T,\ p) - S_0]. \quad (1$$

Здесь H_0 и S_0— энтальпия и энтропия системы, наход щейся в равновесии со средой при T_0, p_0.

Химическая эксергия

Эксергия химического соединения, имеющего форму MX_y, вычисляется как сумма:

$$\varepsilon\,(MX_y) = \Delta G^0\,(MX_y) + \varepsilon\,(M) + y\,\varepsilon\,(X), \quad (1$$

где первый член справа — энергия Гиббса, относяща ся к данной химической реакции образования соедин ния, а второй и третий члены — эксергии компонент реакции. Все они, как правило, известны из термодин мических справочников.

Эксергии химических элементов даны в таблице Ме делеева, где также указаны и их энтальпии (рис. 3) [1

Расчет химической эксергии покажем на примере э сергии метана CH_4, основной компоненты природно газа:

$$C + 2H_2 = CH_4,$$

$$\varepsilon\,(CH_4)_{газ} = \Delta G + \varepsilon\,(C)_{тв} + 2\varepsilon\,(H_2)_{газ} =$$

$$= -51 + 410 + 2 \cdot 235 = 829 \text{ кДж/моль}.$$

На рис. 3, кроме эксергии и энтальпии, указаны та же и химические соединения, принятые за начало отсчет

Подобно тому как это было показано на простом пр мере, с метаном, можно вычислить эксергию любых х мических соединений. Естественно, для этого надо ра полагать (кроме рис. 3) надежной информацией об эне гии Гиббса для химических реакций. Подобные расч ты неизбежно имеют различия, вызванные различие в выборе вещества отсчета и другими причинами. О вел чине возможных различий можно судить, сопоставив зн чения эксергии для основных химических элементо широко используемых в технике и получаемых в энерго емких производствах (табл. 1). Здесь данные Ямауч

Таблица 1. Эксергия химических элементов по данным разных авторов (кДж/моль)

№ элемента	Символ	Молекулярный вес	Концентрация *	[12]	[11]	[13]
1	H_2	2,0	0,9а	238,3 H_2O газ	235 H_2O	237
6	C	12	0,003а	410,5 CO_2 газ	410 CO_2	395
7	N_2	28	75,8а	0,720 воздух	0,32 воздух	0
8	O_2	32,0	20,4а	4 воздух	4 воздух	0
11	Na	23	10^{-2}в	344	360	380
12	Mg	24,3	$12 \cdot 10^{4}$в	627	616	693
13	Al	27	$2 \cdot 10^{-3}$т	888 Al_2SiO_3	790 Al_2O_3	836
14	Si	28	0,47т	803 SiO_2т	850 SiO_2	860
15	P	31	$5 \cdot 10^{-8}$в	860 HPO_4^{--}	866 $Ca_3(PO_4)_2$	795
16	S	32	$8{,}8 \cdot 10^{-4}$в	599 SO_4^{--}	602 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	528
19	K	39	$3{,}8 \cdot 10^{-1}$в	371 K^+	386 KNO_3	401
20	Ca	40	$4 \cdot 10^{-4}$в	717 Ca^{++}	710 $CaCO_3$	792
22	Ti	48	$9 \cdot 10^{-5}$т	876 $TiO_{2т}$	885 TiO_2	890
24	Cr	52	$4 \cdot 10^{-7}$т	539 $Cr_2O_{3т}$	547 $K_2Cr_2O_7$	572
25	Mn	55	$2 \cdot 10^{-4}$т	483 $MnO_{2т}$	461 MnO_2	465
26	Fe	56	$2{,}7 \cdot 10^{-4}$т	378 $Fe_2O_{3т}$	368 Fe_2O_3	370
27	Co	58,9	$9 \cdot 10^{-11}$в	260 Co^{++}	288 $CoFe_2O_4$	292
28	Ni	58,7	$9 \cdot 10^{-11}$в	253 Ni^{++}	243 $NiCl_2 \cdot 6H_2O$	326
29	Cu	63,5	$5 \cdot 10^{-9}$в	134 Cu^{++}	144 $Cu_4(OH)_6Cl_2$	175
30	Zn	65,3	$5 \cdot 10^{-10}$в	353 Zn^{++}	336 $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	388
50	Sn	118,7	$2 \cdot 10^{-5}$т	543 $SnO_{2т}$	510 SnO_2	518
92	U	238	$2 \cdot 10^{-8}$т	1224 $UO_{3т}$	1141 U_3O_8	1180

* а — парциальное давление в атмосфере, кПа; в — массовая доля в морской воде; т — мольная доля в литосфере.

11], уже известные из рис. 3, сопоставлены со значениями тех же величин по данным Шаргута [12] и Степанова [13]. В целом они согласуются с достаточной для технических расчетов точностью, но имеются и существенные расхождения, например для кремния, марганца и олова, где вещества отсчета у [11] и [12] одинаковы.

Характерной особенностью расчетов [12] в отличие от [11] является широкое использование ионов в растворах как вещества отсчета. Химическая эксергия топлива

	Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIII
1	^{4}H 28.11 34.16 (H_2O)							
2	^{27}Li 88.90 ($LiCl{\cdot}H_2O$) 97.58 (LiCl)	^{47}Be 142.03 ($BeO{\cdot}Al_2O_3$) 153.65 ($BeSO_4{\cdot}4H_2O$)						
3	^{9}Na 86.23 111.82 ($NaNO_3$)	^{11}Mg 147.26 173.49 ($CaCO_3{\cdot}MgCO_3$)						
4	^{10}K 92.46 118.22 (KNO_3)	^{8}Ca 170.26 194.41 ($CaCO_3$)	^{50}Sc 216.72 228.11 (Sc_2O_3)	^{12}Ti 211.66 225.80 (TiO_2)	^{23}V 168.47 185.3 (V_2O_5)	^{21}Cr 130.84 ($K_2Cr_2O_7$) 136.2 (Cr_2O_3)	^{14}Mn 110.24 124.29 (MnO_2)	^{7}Fe 87.99 (Fe_2O_3 170.37 $Fe(NO_3)_3{\cdot}9H_2O$)
5	^{18}Rb 93.11 118.32 ($RbNO_3$)	^{22}Sr 184.31 ($SrCl_2{\cdot}2H_2O$) 241.74 ($Sr(NO_3)_2{\cdot}4H_2O$)	^{32}Y 222.86 ($Y(OH)_3$) 228.48 (YF_3)	^{20}Zr 253.01 268.21 ($ZrSiO_4$)	^{34}Nb 209.87 227.0 (Nb_2O_5)	^{37}Mo 170.75 173.99 ($CaMoO_4$)	Tc	^{73}Ru 0.0 0.0 (Ru)
6	^{42}Cs 93.43 105.84 (CsCl)	^{19}Ba 187.42 237.11 ($Ba(NO_3)_2$)	^{35}La 234.84 281.50 ($LaCl_3{\cdot}7H_2O$)	^{52}Hf 244.56 273.60 (HfO_2)	^{40}Ta 227.22 244.5 (Ta_2O_5)	^{26}W 195.56 198.79 ($CaWO_4$)	Re	^{77}Os 71.021 94.2 (OsO_4)

^{21}Cr
130.84 — Стандартная эксергия (ккал/моль)
($K_2Cr_2O_7$) — Вещество отсчета для эксергии
136.2 — Стандартная энтальпия (ккал/моль)
(Cr_2O_3) — Вещество отсчета для энтальпии

	^{28}Ce 243.96 260.2 (CeO_2)	^{48}Pr 221.36 ($Pr(OH)_3$) 281.30 ($PrCl_3{\cdot}7H_2O$)	^{33}Nd 231.13 277.11 ($NdCl_3{\cdot}6H_2O$)	Pm	^{44}Sm 230.13 276.11 ($SmCl_3{\cdot}6H_2O$)	^{58}Eu 208.53 255.11 ($EuCl_3{\cdot}6H_2O$)	^{45}Gd 229.03 275.11 ($GdCl_3{\cdot}6H_2O$)	^{59}Tb 226.43 273.51 ($TbCl_3{\cdot}6H_2O$)

Рис. 3. Эксергия и энтальпия химических элементов с указанием вещества отсчета

практически совпадает с высшей теплотворной способностью, что и принимается в большинстве расчетов. Для углей разного состава и разных жидких углеводородных топлив они различаются менее чем на 2%. Расчет эксергии и энтальпии, наиболее распространенных процессов,

VIII	Ib	IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	0
								^{72}He 7.20 0.0 (He)
			^{41}B 145.86 159.08 (H_3BO_3)	^{3}C 98.12 94.05 (CO_2)	^{2}N 0.08 0 (air)	^{1}O 0.47 0 (air)	^{17}F 73.62 60.77 ($Ca_{10}(PO_4)_6{\cdot}F_2$)	^{76}Ne 6.47 0.0 (Ne)
			^{6}Al 188.39 (Al_2O_3) 271.39 ($Al(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$)	^{5}Si 203.81 217.72 (SiO_2)	^{15}P 206.97 200.84 ($Ca_3(PO_4)_2$)	^{16}S 144.07 152.38 ($CaSO_4{\cdot}2H_2O$)	^{13}Cl 5.61 (NaCl) 0 (Cl_2)	^{54}Ar 2.79 0.0 (Ar)
^{24}Ni 58.19 92.78 ($NiCl_2{\cdot}6H_2O$)	^{25}Cu 34.37 ($Cu_4(OH)_6Cl_2$) 59.67 ($CuCl_2{\cdot}2H_2O$)	^{31}Zn 80.65 141.41 ($Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$)	^{39}Ga 118.59 130.15 (Ga_2O)	^{43}Ge 117.86 131.7 (GeO_2)	^{49}As 92.3 110.53 (As_2O_3)	^{70}Se 39.99 (SeO_2) 64.27 ($H_2SeO_4{\cdot}H_2O$)	^{46}Br 8.21 5.82 ($PtBr_2$)	Kr
^{71}Pd 0.0 0.0 (Pd)	^{69}Ag 20.63 30.37 (AgCl)	^{32}Cd 72.70 ($CdCl_2{\cdot}^3{}_2H_2O$) 109.06 ($Cd(NO_3)_2$)	^{68}In 98.57 110.64 (In_2O_3)	^{30}Sn 123.26 138.8 (SnO_2)	^{61}Sb 97.92 116.15 (Sb_2O_5)	^{78}Te 63.66 77.10 (TeO_2)	^{64}I 6.12 1.61 (KIO_3)	Xe
^{74}Pt 0.0 0.0 (Pt)	^{75}Au 0.0 0.0 (Au)	^{65}Hg 31.48 53.60 ($HgCl_2$)	^{63}Tl 40.56 (Tl_2O_4) 75.3 ($TlCl_3$)	^{36}Pb 80.61 (PbCl(OH)) 85.9 ($PbCl_2$)	^{67}Bi 70.92 (BiOCl) 90.6 ($BiCl_3$)	Po	At	Ru

^{57}Ho 231.03 278.01 ($HoCl_3{\cdot}6H_2O$)	^{55}Er 229.63 277.11 ($ErCl_3{\cdot}6H_2O$)	^{66}Tm 213.74 225.70 (Tm_2O_3)	^{55}Yb 223.64 270.31 ($YbCl_3{\cdot}6H_2O$)	^{60}Lu 219.33 266.71 ($LuCl_3{\cdot}6H_2O$)		^{38}Th 278.41 293.12 (ThO_2)	^{53}U 268.21 284.8 (U_3O_2)	

связанных с использованием твердого топлива (горение, газификация) как сложных смесей, производится суммированием. Энтальпия H и эксергия газовых смесей при нормальных условиях ($T_0 = 298$ К, $p_0 = 1$ ат)

$$H_{\text{хим}} = \Sigma x_i H_i, \tag{15}$$

$$\varepsilon_{\text{хим}} = \Sigma x_i (\varepsilon_i + RT_0 \ln x_i),$$

где x_i — мольная доля компоненты i в смеси, H_i — ее э
тальпия в газовой фазе при T_0, p_0, а ε_i — ее эксерги
при тех же условиях.

Для расчета H и ε при данных параметрах T и p нуж
но сложить $H_{хим}$ и $\varepsilon_{хим}$ с физической частью энтальпи
и эксергии:

$$H = H_{хим} + \Delta H;\ \varepsilon = \varepsilon_{хим} + \Delta\varepsilon.$$

Величины ΔH и $\Delta\varepsilon$ для идеального газа определяютс
по известным соотношениям:

$$\Delta H = \int_{T_0}^{T} C_p\, dT \approx C_p (T - T_0), \qquad (16$$

$$\Delta\varepsilon = \int_{T_0}^{T} (1 - T_0/T)\, C_p\, dT + RT_0 \ln p/p_0. \qquad (17$$

Здесь C_p — теплоемкость смеси, средняя с учетом моль
ных долей компонентов:

$$C_p = \Sigma x_i C_{pi}.$$

Следует подчеркнуть, что эксергия отличается от энер
гии не всегда. Если в процессе преобразования нет ника
ких статистических закономерностей и хаотического (теп
лового) движения, если все детерминированно или, иными
словами, если число возможных состояний равно единице
а логарифм его (энтропия) равен нулю, то энергия и эксер
гия совпадают. Так, в механике всех макроскопических,
т. е. достаточно больших, тел, в электромагнетизме, рас
пространении волн состояние системы обычно определяет
ся однозначно, здесь нет места вероятностным законам
и энтропии, и здесь энергия не отличается от эксергии.

Но теплота и химические реакции связаны с движе
нием невообразимо большого числа частиц, в котором поря
док определяется через законы хаоса,— здесь энтропия
является важнейшим параметром, и поэтому энергия и
эксергия сильно отличаются.

Эксергетический вектор

Теперь, действуя по аналогии с (1), можем написать для
вектора плотности потока эксергии эксергетический век
тор Умова:

$$\delta_\varepsilon = \varphi \mathbf{j}_q + V \mathbf{j}_p + G_\varepsilon \mathbf{j}_m + (T - T_0)\, \mathbf{j}_s. \qquad (18)$$

Отличие от (1) состоит в замене G на G_ε — химиче
скую эксергию и множителя T на $(T - T_0)$ перед потоком
энтропии j_s. Разумеется, для δ_ε нет закона сохранения,
и нельзя записать уравнение типа (4). Более того, в силу
второго закона термодинамики можно утверждать, что
в любом процессе передачи энергии поток эксергии толь
ко уменьшается. Мера сохранения эксергии в потоке по
отношению к входному или начальному значению может
служить коэффициентом полезного действия.

В прошлом веке ирландский инженер Сэнки приду
мал способ наглядного изображения потоков энергии —
в виде полосы, ширина которой пропорциональна потоку
энергии. Если энергия «терялась», значит, от основного
потока отделялись нежелательные ручейки энергии, не до
ходившие до потребителя, они уходили в воздух или
в землю. Такие ручейки-потери на диаграмме Сэнки изоб
ражались отходящими от основной полосы стрелками
разной ширины. Точно так же можно изображать и пото
ки эксергии — это предложил швейцарец Грассман.
В отличие от потока энергии, который в изолированной
трубе уменьшаться не может, поток эксергии уменьшается
там, где растет энтропия, и даже в идеально изолирован
ной трубе может снижаться до нуля.

Теперь взгляните на обложку книги. На ней нагляд
но изображены потоки энергии и эксергии в солнечном
пруде. Подробно о том, что такое солнечный пруд и для
чего он нужен, речь пойдет в главе 8, а здесь отметим
лишь, что это неглубокий водоем с соленой водой, которая
внизу, возле дна, нагревается солнцем почти до кипения,
а вверху так же холодна, как окружающий воздух. На
широкой стрелке — потоке излучения от Солнца — вы
делена более узкая полоса — эксергия этого излучения.
Попадая в пруд, бóльшая часть потока энергии уходит
вверх и при температуре окружающей среды T_0 переда
ется атмосфере. Обратите внимание на то, что поток энтро
пии $S = j_s F$ — это произведение плотности потока на пло
щадь. Полоса эксергии в этом потоке сходит на нет, и сбра
сываемая в атмосферу эксергия близка к нулю.

Другая, меньшая часть потока энергии уносится в тру
бу, по которой откачивается соленая вода из нижней час
ти пруда. Поскольку температура ее много выше T_0,
здесь поток эксергии $(T - T_0)\, S$ довольно велик. Диа
грамма показывает, что часть эксергии солнечной радиа
ции удается уловить и направить в трубу и далее к энер
гетической установке. Остальная эксергия бесследно ис-

чезает. Но поток энергии, разумеется, сохраняется одинаковым по всему пути, он лишь разделяется на две части — отдаваемую в атмосферу (потери) и отводимую с водой в трубу.

На задней стороне обложки мы видим воздушный шарик, в который из комнаты втекает поток теплоты T_0S. В отличие от солнечного пруда здесь окружающая среда (воздух в комнате) вызывает нагрев, а не охлаждение.

Еще раз подчеркнем, что выбор окружающей среды для расчета эксергии неоднозначен и определяется смыслом решаемой задачи. Вспомните оговорку в определении T_0 и p_0: они не должны зависеть от процессов, протекающих в рассматриваемом устройстве или, точнее, эта зависимость должна быть пренебрежимо мала. Действительно, температура воздуха в комнате не изменится от того, что мы внесли в нее холодный шарик, а температура воздуха над прудом не зависит от нагрева воды возле его дна. Или пример с аквариумом на корабле. При расчете температуры (нагрева или охлаждения) воды аквариума для комфортных условий плавающих там рыбок окружающей средой можно принять воздух в каюте, где находится аквариум. Но для расчетов эксергетической эффективности системы кондиционирования этого воздуха окружающей средой уже будет служить вода в океане вокруг корабля.

Иногда эксергию называют мерой качества энергии. Чем больше доля эксергии, тем выше качество энергии. Эта трактовка не очень удачна, потому что в случаях, когда температура окружающей среды выше температуры системы, эксергия становится больше энергии и не может быть ее частью.

Эти случаи очень распространены в технике: повсеместно, от домашнего холодильника и кондиционера до мощных криогенных установок, мы имеем дело с потоками холода, т. е. потоками теплоты $\dot{Q}$ при температуре ниже окружающей, которые обладают вполне определенной эксергией $\dot{\varepsilon} = \dot{Q}\,(T_0 - T)/T$. Она может неограниченно возрасти при попытках получить абсолютный нуль температуры или бесследно исчезнуть при приближении температуры к окружающей.

В прошлом веке один пивовар, использовавший холод для приготовления пива, был вынужден пропустить трубы с охлажденным потоком от холодильной машины через чужое промежуточное помещение. Мясник, занимавший это помещение, на трубы укладывал мясо, которое так дольше сохранялось. У пивовара нарушался технологический процесс, пошло бракованное пиво, и он подал в суд на мясника за кражу энергии. Но мясник заявил, что он, наоборот, не крал, а подводил энергию от парного мяса в холодный поток,— и процесс выиграл. Если бы пивовар знал о существовании эксергии холода, то не проиграл бы дело, ибо здесь кража чужой эксергии налицо.

Потери эксергии

Кража эксергии — явление крайне редкое, а вот потери ее — неизбежный спутник всех процессов передачи и преобразования энергии. Где же эксергия теряется?

Во-первых, там же, где и энергия, когда есть потоки вещества, уносящие энергию из системы,— это так называемые внешние потери, причем их величина может быть совсем не такой, как у потерь энергии. Более важны внутренние потери эксергии от различных видов трения (их мы проиллюстрируем ниже на примерах о течении в трубе, где потерь энергии нет совсем).

Потери эксергии происходят, когда передается теплота с большой разностью температур, во всех случаях механического трения, электрического сопротивления и смешения потоков.

Поставим вопрос так: задан поток теплоты $\dot{Q} = T\dot{S}$. Какую максимальную механическую мощность можно из него получить? Здесь надо вспомнить, что максимальная работа определяется эксергией системы, а мощность— потоком эксергии. Сопоставляя выражения (18) и (1), видим, что поток эксергии определяется последним членом в (18), т. е. он равен $(T - T_0)\,\dot{S}$, это и есть ответ на поставленный вопрос.

Отношение этих членов — потоков эксергии и теплоты

$$\eta_к = (T - T_0)/T = 1 - T_0/T \qquad (19)$$

называется эксергетической температурной функцией. Оно же представляет собой коэффициент полезного действия идеального теплового двигателя, в котором нет рождения энтропии, а значит, и исчезновения эксергии.

Рождение энтропии — это важнейшая особенность всех энергетических процессов. Оно происходит вследствие действия так называемого обобщенного трения— не только механического трения, к которому мы все привыкли (трение подошвы об асфальт или воды о стенку трубы). Сюда относится и электрическое трение— сопротивление

движению зарядов в проводнике (вспомните закон Ома), «термическое трение» при передаче потока теплоты между теплоносителями, имеющими разные температуры.

При передаче тепла Q от потока жидкости с температурой T_2 к потоку с температурой T_1 потеря эксергии от «термического трения» составляет

$$D = Q\,(T_2 - T_1)/T_2.$$

Те, кто уже умеет обращаться с векторными символами и вычислять div δ, могут подставить (1) в (3) и вычислить интенсивность рождения энтропии для стационарного движения, когда $\partial/\partial t = 0$ и от времени никакие величины не зависят. Стационарные потоки очень часто встречаются в практических расчетах, и для них div δ = 0. Кроме того, здесь и div $\mathbf{j}_q$ = div $\mathbf{j}_m$ = div $\mathbf{j}_p$ = 0, тогда получается

$$-T\sigma_s = \mathbf{j}_q \cdot \operatorname{grad}\varphi + \mathbf{j}_p \cdot \operatorname{grad} V + \mathbf{j}_m \cdot \operatorname{grad} G + \mathbf{j}_s \cdot \operatorname{grad} T \qquad (20)$$

Символ grad (градиент) обозначает вектор, показывающий величину и направление наибольшего изменения потенциалов φ, V, G, T.

Произведение вектора плотности потока j на вектор градиента — величина скалярная, это— произведение величин векторов на косинус угла между ними. Если векторы перпендикулярны, она равна нулю, а если направлены в противоположные стороны, то перед произведением ставится минус. В изолированной системе все потоки направлены в сторону уменьшающихся потенциалов, поэтому все произведения j·grad отрицательны, а рождение энтропии σ_s положительно, как того и требует второй закон термодинамики.

Первый член суммы $\mathbf{j}_q \cdot \operatorname{grad}\varphi$ — джоулево тепло, следствие «электрического трения», т. е. трения зарядов о кристаллическую решетку проводника, если это металл, или трения о нейтральные частицы, если это поток зарядов в жидкости или газе. Напоминаем, что $-\operatorname{grad}\varphi = E$— напряженность электрического поля.

Второй член $\mathbf{j}_p \cdot \operatorname{grad} V$ — теплота механического трения, когда поток импульса теряет скорость. В качестве примера можно рассмотреть ударную волну в потоке быстро движущегося газа — иногда ее называют «скачком уплотнения». В ней очень резко, на коротком расстоянии, скорость газа уменьшается, поэтому grad V очень велик и интенсивно возрастает энтропия. В этом основная причина большого расхода топлива в сверхзвуковых самолетах.

Третий член $\mathbf{j}_m \cdot \operatorname{grad} G$ — теплота смешения потоков разных химических веществ (химическое трение). Здесь можно апеллировать к повседневному опыту читателя: самопроизвольно все вокруг нас только перемешивается и загрязняется. Чтобы разделить или очистить, нужно всегда потрудиться.

Последний, четвертый член $\mathbf{j}_s \cdot \operatorname{grad} T$ интересен тем, что показывает, как поток энтропии сам рождает энтропию из-за «термического трения», когда он протекает в среде с неоднородной температурой:

$$\sigma_s = -\frac{\mathbf{j}_s}{T} \cdot \operatorname{grad} T. \qquad (21)$$

При передаче энергии в твердом теле плотность потока теплоты имеет вид

$$Tj_s = -\lambda \operatorname{grad} T, \qquad (22)$$

а значит,

$$\sigma_s = \lambda \left(\frac{\operatorname{grad} T}{T}\right)^2. \qquad (23)$$

Здесь λ — коэффициент теплопроводности твердого тела. Мы видим, что, чем резче изменяется температура, тем интенсивнее рождение энтропии.

Все четыре слагаемых представляют собой теплоту, вызванную обобщенным трением — электрическим, механическим, химическим и термическим. Иногда эту теплоту называют диссипацией (рассеянием) энергии.

Идеальный тепловой двигатель — двигатель без обобщенного трения, т. е. без рождения энтропии. В нем изменение температуры рабочего тела происходит только из-за изменения его объема, теплопередача осуществляется при ничтожно малой разности температур, полностью исключено трение в подшипниках и смешение разных химических веществ (в том числе и горение). Иногда процессы в таком идеальном двигателе называют «обратимыми»: они могут происходить в обоих направлениях, т. е. передача энергии может идти от теплоты к работе и наоборот в равных количествах.

Все реальные процессы в этом смысле необратимы из-за трения и рождения энтропии. В котле электростанции из-за термического и химического трения исчезает 43% эксергии, а в водогрейном котле — около 80%. Обобщенное трение — основная физическая причина того, что

называется потерями энергии, а на самом деле является потерями эксергии. Борьба с обобщенным трением или, что то же самое, с необратимостью — главная задача энергетики.

Значение эксергии

Глубокий смысл понятия «эксергия» вытекает из эквивалентности убывания эксергии и возрастания энтропии в изолированной системе. Убывание эксергии неизбежно в силу второго закона термодинамики. В отличие от энергии эксергия действительно означает способность производить работу. В обычной повседневной практике слова «энергосбережение, экономия энергии» на самом деле означают экономию эксергии. В силу закона сохранения материи суммарная масса всех веществ и соединений на земле остается постоянной. Вода любой степени загрязненности может быть очищена до питьевого качества — эта технология хорошо разработана, но она требует затрат эксергии. Любой металл может быть получен и из бедных руд, и из окислов, подобных ржавчине, но и этот процесс требует все бóльших затрат эксергии.

Можно представить себе человеческое общество (его называют автотрофным), которое не берет у природы никаких материальных тел для своего существования, и закон сохранения материи вполне позволяет это, но вследствие второго закона термодинамики такое общество не сможет существовать без притока эксергии. Эксергия, необходимая для восстановления металлов из окислов, опреснения воды и всех видов иной созидательной деятельности, в настоящее время на 96% получается из запасов органического топлива. Поэтому очевидно, что именно эксергия первичного топлива является тем основным ресурсом (в отличие, например, от руды, воды и пр.), который подлежит сбережению (подробнее об этом см. в гл. 9).

Наиболее четкое и краткое современное изложение определения понятия «эксергия» и история его развития даны Шаргутом в упоминавшейся нами статье.

«Поддержание существования человечества и его деятельности возможно благодаря использованию природных ресурсов. Они представляют собой такую форму материи, которая по своему химическому составу или параметрам состояния существенно отличается от средних значений, встречающихся в природе.

Поэтому параметры состояния и состав наиболее распространенных веществ в природе можно принять за нулевой уровень отсчета практической пригодности энергии природных ресурсов и произведенных энергоносителей. Способность производить работу, отсчитываемая от упомянутого уровня, и была названа в Европе „эксергия“. Эта величина может быть определена следующим образом:

Эксергия — это количество работы, которое может быть получено, когда некоторое вещество приходит в состояние термодинамического равновесия с наиболее распространенными компонентами окружающей среды путем обратимых процессов, включающих взаимодействие только с упомянутыми компонентами окружающей среды.

Основная задача эксергетического анализа состоит в определении и количественной оценке влияния необратимых явлений, снижающих термодинамическое совершенство рассматриваемых процессов.

...Эксергетический анализ дает информацию относительно возможного улучшения термодинамических процессов, но только экономический анализ позволяет решить, рационально такое улучшение или нет» [12, с. 710].

По мере снижения температуры увеличивается разница между энтальпией и эксергией, поэтому процессы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, при которых отличие температур потоков от окружающей температуры мало́, необходимо описывать в эксергетических величинах. Когда природные ресурсы представляют собой источники теплоты невысокой температуры, отличие их эксергии от энтальпии особенно велико́. Поэтому, например, Геологический комитет США учитывает геотермальные ресурсы по их эксергии, а не по энтальпии.

Иногда встречается следующее возражение против применения понятия «эксергия»: способность производить работу как мера качества энергии была бы важна, если бы народное хозяйство всю энергию потребляло в виде механической работы. Фактически же в нашей стране более 50% первичных энергоресурсов используется в виде тепла довольно низкой температуры (до 100° С), поэтому хорошая способность производить работу здесь ни к чему и незачем вводить в практику новое понятие, мало знакомое большинству энергетиков.

Однако здесь следует подчеркнуть, что высокий потенциал теплоты (т. е. большая эксергия) полезен и тогда, когда потребитель требует тепло низкого потенциала, потому что 1 Дж высокопотенциального тепла позволяет

с помощью трансформации тепла получить 2 или 3 Дж низкопотенциального тепла, а это приведет к существенному снижению затрат первичных энергоресурсов. Поэтому в нашей стране расчеты эксергии приобретают не меньшую, а относительно бóльшую важность по сравнению с другими странами из-за более сурового климата и большой доли теплоснабжения.

Много десятилетий продолжаются споры о том, как распределять затраты топлива на электроэнергию и теплоту при их совместном производстве на ТЭЦ. Разные способы такого распределения приведены, в частности, в книге Шаргута и Петелы [2].

Пессимистическое отношение к термодинамическим методам распределения было характерно в начале 50-х годов, когда понятие «эксергия» (или, как тогда говорили, «техническая работоспособность») было еще малоизвестно. Так, в статье 1953 г. утверждалось, что методы распределения экономии топлива при комбинированном процессе выработки тепла и электроэнергии... не могут вытекать из законов термодинамики и все попытки непосредственного термодинамического обоснования того или иного способа разнесения экономии топлива между видами полученной энергии лишены научного обоснования *. Такое категорическое утверждение несет на себе характерный отпечаток того времени. Но в последние годы все более популярной становится методика простого и наглядного распределения любых затрат (и текущих затрат топлива, и капитальных затрат на строительство объекта): пропорционально выдаваемым потокам эксергии. По-видимому, в недалеком будущем споры на эту тему прекратятся и распределение затрат пропорционально потокам эксергии станет общепринятым **.

---

* См.: Вопросы определения КПД электростанций. М.: Госэнергоиздат, 1953.

** Подробным руководством для таких расчетов может служить недавно изданная книга: *Бродянский В. М.*, *Фратшер В.*, *Михалек К.* Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1988.

Глава 3. Добыча из океана

Под ним струя светлей лазури,
Над ним луч солнца золотой.
М. Ю. Лермонтов

Эксергия океана

Мы вспоминаем о Черном море как источнике энергии, но не работы. Получить работу, охлаждая море, нельзя. Для получения работы обязательно требуется природная разность потенциалов или природный поток эксергии. Именно такова ситуация в тропических морях и тропических зонах Мирового океана, где верхний (сравнительно тонкий — единицы метров) слой воды нагревается Солнцем, а внизу, на глубине в несколько сотен метров, в голубой («лазурной» — у поэта) толще воды всегда одинаковая низкая температура.

Типичные цифры таковы: нагретый слой имеет температуру (t_2) 25° С, температура на глубине (t_1) 5° С. Эта разность (20° С), по мысли французского физика Д'Арсонваля, высказанной в 1881 г., достаточна для получения работы, т. е. для создания теплового двигателя, использующего морскую воду в качестве топлива. На первый взгляд кажется, что такая малая разность температур приведет к очень низкой плотности притока энергии, а это обусловит огромные и, может быть, чрезмерные размеры теплообменников океанского двигателя (вспомните низкую плотность энергии в хвостовых частях паровых котлов и их огромные размеры).

Оценим величину эксергетического вектора Умова в потоке воды:

$$\delta_\varepsilon = \rho V C \Delta T\ (\Delta T/T) = 10^3 \cdot 1 \cdot 4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 20/300 =$$
$$= 5 \cdot 10^6\ \text{Вт/м}^2.$$

Здесь приняты округленные величины плотности и теплоемкости воды и умеренная величина ее скорости $V = 1$ м/с. Эксергия получена умножением энтальпии $C\Delta T$ на температурную функцию $\Delta T/T = (t_2 - t_1)/T$. Оценка

показывает, что в силу высокой теплоемкости воды плотность потока эксергии здесь примерно в 100 раз выше, чем в хвостовой поверхности энергетического котла, и в 1000 раз выше солнечной постоянной (1300 Вт/м^2) — плотности потока солнечной энергии, падающего на нашу планету. Оказалось, что океан — не только аккумулятор, но и концентратор солнечной энергии.

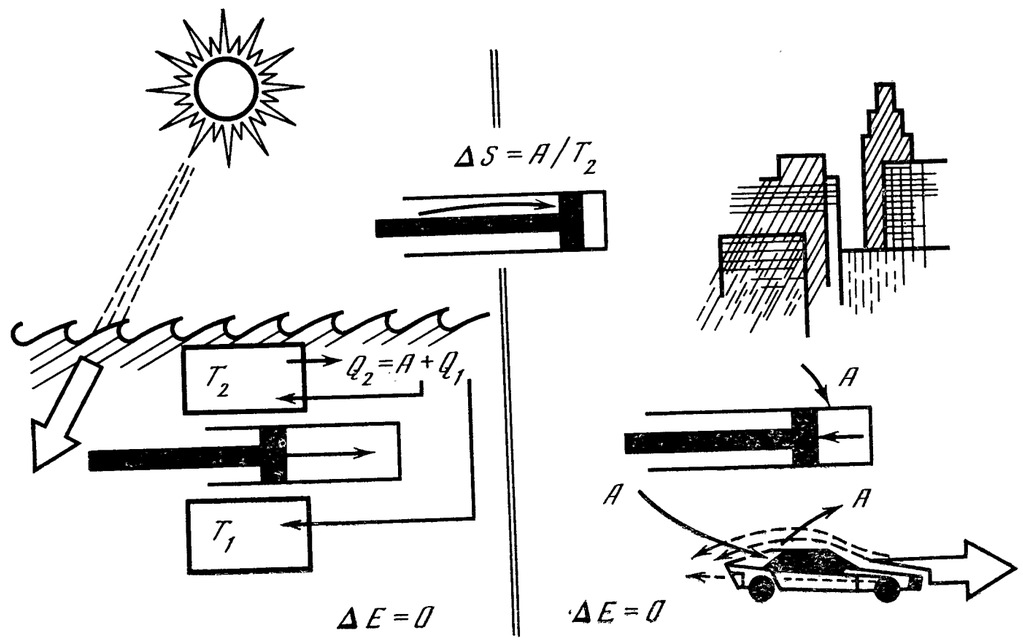
От разницы температур δ_ε зависит в квадрате, так что при уменьшении ΔT ниже 20 К приток эксергии резко снижается.

Через 100 лет идея Д'Арсонваля получила широкое мировое признание и вызвала к жизни много экспериментальных установок. Во всех реализованных установках теплая вода из верхних слоев океана омывает теплообменник — «котел», где кипит специальное рабочее тело — тот же фреон, что и в тепловом насосе; пары фреона вращают турбину с генератором электроэнергии, а затем конденсируются в другом теплообменнике, охлаждаемом водой из глубин океана. Вообще говоря, такая установка — это уже описанный нами «тепловой насос наоборот». Тепловой насос создает разность температур в потоке энтропии, затрачивая электроэнергию, а океанский двигатель выравнивает природную разность температур и выдает электроэнергию.

Чтобы не вдаваться в технические тонкости и в то же время проиллюстрировать роль эксергии, рассмотрим упрощенный пример (рис. 4).

Если энергию верхнего слоя воды передавать нижнему слою в форме теплоты Q_2 через океанский тепловой двигатель, производящий работу A, то к нижнему слою подойдет лишь теплота $Q_1 = Q_2 - A$. Положим, что вся работа A затрачивается на сжатие воздуха в цилиндре с поршнем при температуре окружающей среды, которая в данном случае равна T_2 (цилиндр погружен в воду). Изотермическое сжатие требует отвода теплоты A, которая воспринимается верхним слоем океана. Таким образом, общее количество энергии в океане не изменилось, причем не изменилось в точности, а не потому, что масса океана велика [10].

При изотермическом сжатии (с отводом теплоты) энтропия воздуха в цилиндре уменьшилась на величину $\Delta S = A/T_2$, а энтропия океана на эту же величину возросла — произошло выравнивание температур между верхним и нижним его слоями. Поэтому эксергия океана уменьшилась, и появилась эксергия воздуха в цилиндре



Р и с. 4. Передача эксергии сжатым воздухом из океана в город с автомобилем

после сжатия: $\varepsilon = T_2 R \ln p/p_0$ (см. формулу (17)). Энергия же воздуха в цилиндре неизменна, так как его температура осталась такой же, как и до сжатия.

Затем цилиндр со сжатым воздухом перевезли в город, атмосфера которого имеет ту же температуру T_2. Возникает вопрос: что же фактически при этом было перевезено? Можно говорить, что перевезена эксергия.

Энергия воздуха в цилиндре осталась неизменной. Но появившаяся после изотермического сжатия эксергия позволяет получить работу. Поэтому, если представить себе, что автомобиль снабжен пневматическим двигателем, то сжатый воздух при расширении в этом двигателе позволит автомобилю проехать некоторое расстояние. Воздух, расширяясь, охладится и несколько охладит атмосферу в городе, но работа трения при перемещении автомобиля снова подогреет атмосферу до прежней температуры. И в этой термодинамической системе, т. е. в городе, количество энергии в точности сохранится неизменным. Однако в ней достигнут несомненный полезный эффект — перемещение автомобиля, и это произошло за счет возрастания энтропии (убыли эксергии) в океане.

Вместо автомобиля приемником работы мог бы быть пневмонасос, закачивающий воду на некоторую высоту. Тогда привезенная в цилиндре эксергия перешла бы в потенциальную эксергию поднятого груза и атмосфера в городе осталась бы несколько охлажденной.

Распространяя подобный пример на более общий случай, можно было бы считать, что полученная от выравнивания температур в океане работа пошла на электролиз воды и в город привезен водород или иное синтетическое топливо. И в этом случае топливо содержало бы запас химической эксергии, полученной от океана без изменения его энергии, но с уменьшением его эксергии.

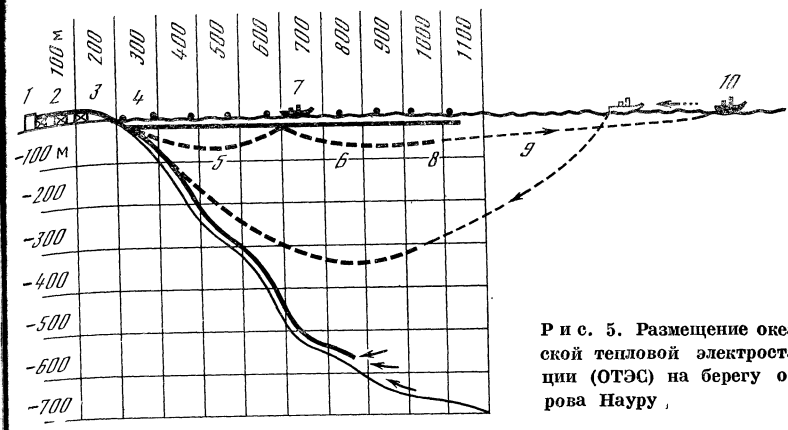
Океанская тепловая электростанция

Обилие нагретой воды в тропических зонах Мирового океана и трудность (дороговизна) снабжения нефтью многих островов и островных государств привели к интенсивному развитию работ по реализации океанских тепловых электростанций (ОТЭС). В настоящее время наиболее впечатляющий практический результат — это электростанция полной электрической мощностью 100 кВт, которую построили японские фирмы на небольшом острове Науру в Тихом океане [14]. Сама электростанция находится на берегу, а теплая и холодная вода подводится полиэтиленовыми трубами диаметром 700 мм и длиной около 1 км.

Схема размещения станции и барж, поддерживающих трубу для теплой воды, приведена на рис. 5. Труба поддерживается баржей *7* и оттягивается баржей *10*.

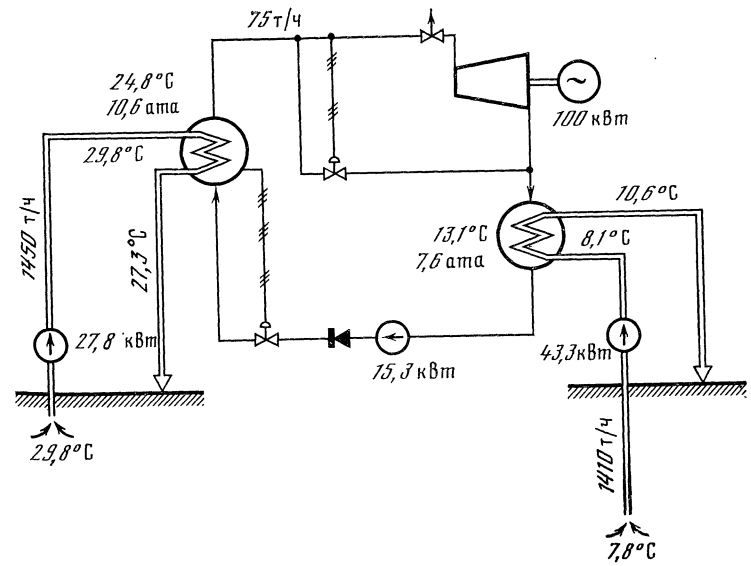
На рис. 6 показана схема этой электростанции с указанием расхода воды и мощности насосов для воды и фреона. Львиная доля генерированной мощности, составляющей 100 кВт, затрачивается на перекачку холодной воды (43,3 кВт), теплой воды (27,8 кВт) и фреонового конденсата (15,3 кВт). Но наличие в такой небольшой установке положительной разности между мощностью турбогенератора и насосов, т. е. выдача электроэнергии внешнему потребителю, представляет выдающееся техническое достижение, открывающее путь к крупным ОТЭС.

В замкнутом контуре этой установки совершает обычный прямой цикл фреон-22: он кипит в испарителе, обогреваемом водой с температурой 29,8° С, вращает турбину и затем конденсируется, охлаждаемый глубинной водой с температурой 8,1° С, так что здесь демонстрируется возможность получения полезной мощности при интервале температур греющей и охлаждающей воды всего лишь 21,7°. Впрочем, мы были подготовлены к оптимистическому взгляду на ОТЭС при оценке величины плотности притока эксергии, которая оказалась весьма высокой — на



Р и с. 5. Размещение океанской тепловой электростанции (ОТЭС) на берегу острова Науру

1 — бетонное основание, *2* — поддерживающая конструкция, *3* — уклон, *4* — понтон, *5* — противовес, *6* — полиэтиленовая труба, *7* — поддерживающая баржа, *8* — вход воды, *9* — оттягивающий трос, *10* — оттягивающая баржа



Р и с. 6. Схема ОТЭС с указанием температур, давлений и мощностей в ее элементах. Полная мощность 100 кВт, собственные нужды — 88,9 кВт

много порядков больше, чем у других возобновляемых источников энергии.

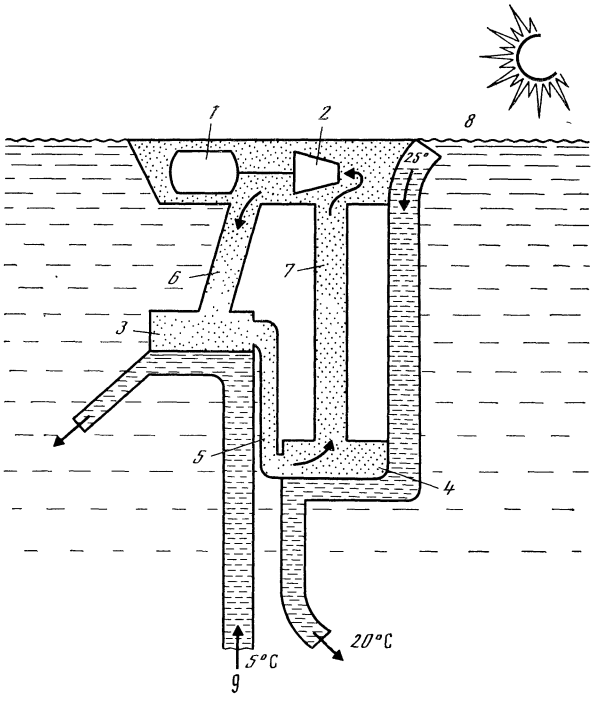
Подробную конструктивную разработку плавающих ОТЭС большой мощности провели две американские фирмы («Локхид» и SSP) [15]. Результаты их расчетов приведены ниже.

	«Локхид» (1978 г.)	SSP (1981 г.)
Разность температур, °С	22,2	22,2
Расход теплой воды, м³/с	400	248
Удельный расход теплой воды, кг/кВт·ч	15 076	9036
Расход холодной воды, м³/с	412	136
Удельный расход холодной воды, кг/кВт·ч	15 585	4953
Площадь испарителя на 1 кВт эл. мощности, м²/кВт	3,26	1,09
Площадь конденсатора на 1 кВт эл. мощности, м²/кВт	2,93	1,16
Мощность, МВт		
полная	132,9	122,4
отдаваемая	98,0	101,6
Диаметр трубы холодной воды, м		8,5
Полный вес,т		25 400
Удельный вес, кг/кВт	2150	250
Рабочее тело	Аммиак	Фреон-22

На рис. 7 приведена схема ОТЭС мощностью 100 МВт, разработанная американской фирмой SSP. На рисунке точками обозначен замкнутый контур с легкокипящим рабочим телом — фреоном. Насосы с турбинным приводом (не указаны на схеме) подают теплую воду из верхней зоны океана в теплообменник — испаритель фреона. Пар фреона проходит через турбину, вращающую электрогенератор, а затем поступает в конденсатор — трубчатый теплообменник, куда подается холодная вода с глубины 500—1000 м.

В отличие от первой ОТЭС в Науру, стоящей на берегу, проект фирмы SSP — плавучая станция. Она способна продемонстрировать все преимущества ОТЭС, поскольку мощность, затрачиваемая на привод насосов и другие собственные нужды, здесь относительно мала. Вообще, все мощные ОТЭС должны быть плавучими, чтобы собирать нагретую солнцем воду с большой поверхности океана.

Разновидностью ОТЭС являются арктические станции, использующие разность температур в воде под льдами и в воздухе. Температура воды около 0° С, а воздуха —30—40° С, так что разность температур у арктических



Р и с. 7. Схема плавучей ОТЭС большой мощности

1 — генератор, *2* — турбина, *3* — конденсатор, *4* — испаритель, *5* — жидкий фреон, *6* — низкое давление, *7* — высокое давление, *8* — поверхностная вода, *9* — глубинная вода

ОТЭС больше, чем у тропических. Но воздух как холодный источник намного хуже воды, потому что его плотность и теплоемкость много ниже. Тем не менее проекты арктических ОТЭС тоже разрабатываются.

Мы так подробно рассмотрели схему ОТЭС потому, что она представляется одной из наиболее эффективных среди других возобновляемых источников энергии. Она имеет практический интерес для всех тропических районов и вскоре будет реализована в полном масштабе. И причиной является высокая концентрация в океане природного потока эксергии из-за нагрева солнцем его верхнего слоя. Еще большая концентрация эксергии солнечного излучения достигается в созданной искусственно модели океана с полным подавлением перемешивания воды — солнечном соляном пруде.

Глава 4. Термоавтоколебания и диссипативные двигатели

Самая главная муза, не изобретенная человеком, а реально существующая,— энтропия. Все, чем отличается этот мир от серого однородного хаоса, возникло и существует вследствие оттока энтропии в окружающую среду. Отрицательной энтропией питается все живое и все созданное жизнью, а значит, наука и искусство. Человек творит отрицательную энтропию, создавая новую, незаменимую информацию.

М. В. Волькенштейн

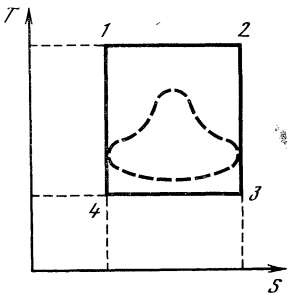
Цикл Карно нереализуем

Модель идеального теплового двигателя послужила основой всей термодинамики. Ее предложил и исследовал французский инженер Сади Карно, единственная опубликованная работа которого «Размышления о движущей силе огня» заслужила навечно память благодарного человечества наряду с «Началами» Ньютона и «Электродинамикой движущихся тел» Эйнштейна. Она была напечатана в Париже в 1824 г., когда автору было 28 лет. Восемью годами позже он умер от холеры. Как и все другие жертвы эпидемии, Карно был похоронен вместе с принадлежавшими ему вещами и бумагами, поэтому, кроме случайно сохранившейся записной книжки, после него ничего не осталось.

Во всех учебниках физики и термодинамики приведен знаменитый цикл Карно на диаграмме температура—энтропия (T—S-диаграмме), изображающий изменение в нем состояния рабочего тела и имеющий вид прямоугольника (рис. 8).

В идеальном двигателе Карно рабочее тело сначала расширяется с подводом теплоты Q и ростом энтропии, но при постоянной температуре $T_г$ (линия *1—2*), затем продолжает расширяться без подвода тепла, т. е. притока энтропии с понижением температуры (*2—3*), затем тепло Q_0 отводится при постоянной температуре T_0 с уменьшением энтропии (*3—4*) и, наконец, сжимается без теплоотдачи с повышением температуры опять до $T_г$ (*4—1*). Количества энтропии — подведенной $S_г = Q_г/T_г$ и отведенной $S_0 = Q_0/T_0$ — в точности равны, а теплота Q_0 меньше $Q_г$ на величину полученной механической работы: $A = Q_г - Q_0$.

Тысячи инженеров после Карно пытались приблизить работу своих двигателей к идеалу, намеченному Карно, и все их усилия были направлены на уменьшение трения, причем не только механического, но главным образом



Р и с. 8. Сопоставление цикла Карно на T—S-диаграмме с циклом диссипативного двигателя

термического, вызванного большой разностью температур источника теплоты, рабочего тела и холодильника, куда отводится теплота.

Карно впервые указал на аналогию между тепловым двигателем и водяной турбиной, где роль разности высот падающей воды играет разность температур, а роль расхода воды — количество гипотетической невесомой жидкости — «теплорода», как тогда трактовали теплоту. Хотя на самом деле никакого теплорода не существует и сам Карно впоследствии в записной книжке писал о теплоте как движении частиц, эта аналогия оказалась плодотворной и привела к правильным выводам. Во времена Карно еще не было понятия об энтропии, но в его рассуждениях роль энтропии играл теплород. Упоминая водяные турбины, Сади Карно опирался на работу о гидравлических двигателях своего отца, Лазáра Карно, известного ученого (был министром внутренних дел в правительстве Наполеона I во время «ста дней»).

В рассмотренных нами на рис. 2 примерах *а*) и *в*) фактически показана та же аналогия, но для обратного процесса — не понижения, а повышения потенциала в потоке зарядов и энтропии. В идеальном тепловом двигателе и тепловом насосе полный поток протекающей энтропии остается неизменным, подобно потоку воды в гидротурбине и гидронасосе.

Для нас полезно здесь вспомнить слова Сади Карно из его записной книжки: «Движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития, ее количество исключительно определяется температурами тел...

Тепло — это движение частиц тела; повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, точно пропорциональном количеству исчезнувшей движущей силы.

Обратно: всегда при исчезновении тепла возникает движущая сила. Таким образом, можно высказать общее положение: движущая сила существует в природе в неизменном количестве; она... вызывает то один род движения, то другой, но никогда не исчезает».

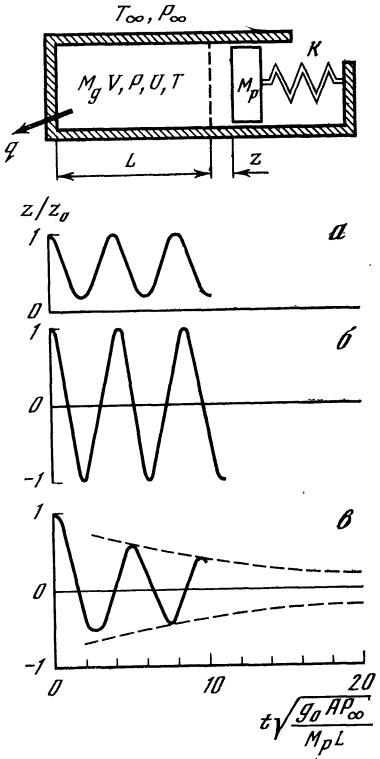
Эти слова свидетельствуют о гениальном предвидении Карно, они составляют основу современного представления о природе окружающего нас мира.

Но идеальный цикл Карно не следует фетишизировать. Попытки слишком близкого приближения к нему могут привести к большому перерасходу энергии. Если же кто-либо попробует реализовать цикл Карно в точности, то он не сможет не только изготовить требуемое оборудование, так как оно должно иметь бесконечно большие размеры, чтобы осуществить передачу энергии без термического трения, т. е. при нулевой разности температур, но и не сможет дождаться завершения замкнутого цикла, поскольку он должен происходить в течение бесконечно большого периода времени. Забегая немного вперед (подробнее об этом см. в гл. 7), можно сказать, что цикл Карно имеет эксергетический КПД 100% и с точки зрения энергии-нетто приведет к бесконечно большим затратам энергии на осуществление процесса.

Все реальные процессы происходят при наличии термического и иных видов трения, они необратимы и должны проходить в реальном масштабе времени.

Сходство механического и термического трения

Теплообмен при конечной разности температур — термическое трение — приводит к потерям эксергии так же, как и привычное нам механическое трение или электрическое трение (омическое сопротивление проводника). Чтобы показать, как термическое трение влияет на механическую систему и вызывает такие же эффекты, как и механическое



Р и с. 9. Схема колебаний поршня в цилиндре

трение (вязкость), рассмотрим конкретный пример [16] — колебания поршня в цилиндре (рис. 9).

Если система чисто механическая, поршень с массой M_p на пружинном креплении с жесткостью k совершает колебания, которые описываются хорошо известным дифференциальным уравнением второго порядка

$$z'' + bz' + \omega^2 z = 0, \quad (24)$$

где b — положительный демпфирующий коэффициент, обусловленный вязким трением поршня о стенки цилиндра через слой жидкой смазки, когда сила трения пропорциональна скорости; ω — частота колебаний, зависящая от отношения массы поршня и жесткости пружины.

Колебания имеют вид

$$z = \exp(-bt/2) \sin \omega \sqrt{1 - (b/2\omega)^2}\, t. \quad (25)$$

Множитель $\exp(-bt/2)$ описывает уменьшение амплитуды колебаний со временем, т. е. затухание колебаний, обусловленное механическим (вязким) трением поршня о стенки цилиндра. Если механического трения нет, т. е. $b = 0$, получаются незатухающие колебания с постоянной амплитудой.

Теперь посмотрим, как может влиять на колебания термическое трение. Положим, что ни пружины, ни механического трения нет и пространство в цилиндре заполнено газом. Внутренняя энергия газа $U = C_V T = \frac{1}{\varkappa - 1} pV$, $V = F(L + z)$ — объем газа в цилиндре и $pV = M_\text{г} RT$ — уравнение состояния идеального газа. При сжатии или расширении температура T газа изменяется и может про-

исходить теплообмен с окружающей средой. Полный поток тепла имеет вид

$$q = \alpha F_q (T - T_\infty). \qquad (26)$$

Теперь уравнение движения поршня (малые колебания) имеет вид

$$\frac{d^3\bar{z}}{d\bar{t}^3} + D\frac{d^2\bar{z}}{d\bar{t}^2} + B\frac{d\bar{z}}{d\bar{t}} + K\bar{z} = 0, \qquad (27)$$

где $\bar{z} = z/z_0$; $\bar{t} = t\sqrt{\frac{g_0 F P_\infty}{M_p L}}$; D, B и K — постоянные.

В случае, когда стенки цилиндра теплоизолированны (адиабатное движение), $\alpha = D = K = 0$, так что

$$d^2\bar{z}/dt^2 + B\bar{z} = \text{const} = B\bar{z}_0. \qquad (28)$$

Графиком такого движения являются синусоидальные незатухающие колебания относительно сдвинутого начального положения (см. рис. 9, *а*).

В случае изотермического движения теплоотдача через стенки так велика, что температура газа внутри цилиндра не изменяется и всегда равна T_∞, при этом $\alpha = \infty$, а D и K неограниченно возрастают. Поделив все члены на K, оставляем в уравнении движения только

$$\frac{d^2\bar{z}}{dt^2} + \left(1 + \frac{kL}{P_\infty F}\right)\bar{z} = 0, \qquad (29)$$

что описывает незатухающие синусоидальные колебания относительно исходного положения $z = 0$ (см. рис. 9, *б*).

Оба этих крайних случая $q = \alpha = 0$ и $\alpha = \infty$ отражают отсутствие термического трения (отсутствие диссипации энергии, отсутствие роста энтропии). Рост энтропии при термическом трении

$$dS/dt = \dot{S} = q/T - q/T_\infty = q\,(1/T - 1/T_\infty). \qquad (30)$$

Очевидно, что в обоих случаях ($q = 0$ или $T = T_\infty$) должно быть $dS/dt = 0$. Но при любом другом α между 0 и ∞ в системе обязательно будет термическое трение, когда $dS/dt > 0$ и колебания становятся затухающими, как показывает решение уравнения (см. рис. 9, *в*). В целом процесс затухания колебаний становится таким же, как и в случае механического трения, только уравнение сложнее и его приходится решать численно. Здесь сходство в проявлении механического и термического трения налицо.

Диссипативный двигатель

Однако термическое трение при некоторых условиях может не только тормозить, демпфировать колебания поршня, но и вызывать их. Более того, стационарный поток теплоты, проходящий через газ в цилиндре с поршнем, может создавать столь значительную силу, вызывающую колебания, что при этом часть потока теплоты преобразуется в механическую или электрическую мощность.

Разумеется, для этого поток теплоты должен быть соответствующим образом направлен. Тогда цилиндр с поршнем становится своеобразным тепловым двигателем, который конструктивно отличается от обычных, хорошо всем

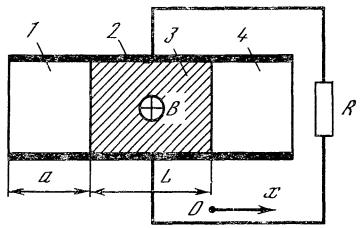


Рис. 10. Схема получения термоавтоколебаний (диссипативный двигатель)

известных поршневых двигателей (скажем, автомобильных) полным отсутствием отверстий, клапанов и вообще какой-либо периодичности в подводе и отводе теплоты. Принцип его действия покажем на примере, где используется электропроводность поршня и его колебания позволяют отводить электроэнергию во внешнюю электрическую сеть [17]. Поршень мог бы с таким же успехом отдавать мощность какому-нибудь механическому аккумулятору эксергии, например быстро вращающемуся маховику или баллону со сжатым воздухом.

Рассмотрим схему в следующей идеализированной постановке (рис. 10). Посредине прямой герметической трубки помещен электропроводный поршень *3*, разделяющий полости *1* и *4*, заполненные идеальным газом. Поршень находится в однородном постоянном магнитном поле, ориентированном по оси z, боковые электродные стенки *2* замкнуты через нагрузку R. Если поршень не испытывает действия тормозящих сил и стенки теплоизолированы, то смещение поршня от центра трубки вызовет незатухающие гармонические колебания. Роль упругого звена играет газ в замкнутых полостях по обе стороны поршня. Если же стенки допускают теплообмен, а их температура поддерживается постоянной, то колебания будут затухающи-

ми. Действительно, смещение поршня, вызывающее сжатие газа в одной из полостей, приведет к превышению температуры газа над температурой стенок и, следовательно, к теплоотдаче через стенки. Поэтому температура и давление газа в этой полости будут меньше, чем в адиабатическом случае. В другой полости давление будет выше, чем для теплоизолированных стенок. Таким образом, на поршень будет действовать разность давлений меньшая, чем в адиабатическом случае, что и приведет к затуханию колебаний.

До сих пор все соответствует ранее рассмотренному случаю, когда термическое трение только гасит колебания. Если теперь нагреть торцы трубки до температуры $T_т$ и охладить боковые стенки до температуры T_w, то, начиная с некоторого порогового значения температуры T_w, колебания станут незатухающими даже при наличии тормозящих сил. Температура $T_т$ должна быть достаточно высокой, чтобы при смещении поршня и сжатии им газа в одной из полостей происходило дополнительное повышение температуры и, следовательно, давления по сравнению со случаем адиабатического сжатия. Возникающая дополнительная разность давлений компенсирует действие тормозящих поршень сил, что и приводит к автоколебаниям. Совершается обычный замкнутый круговой процесс преобразования тепла в работу: нагревается сжатый газ, расширяется нагретый, охлаждается расширившийся и сжимается охлажденный.

Недостатком такого цикла является неизбежное «опережение» подвода тепла и «опережение» охлаждения. Подвод тепла происходит во время всего хода сжатия из-за уменьшения поверхности теплоотдачи, а охлаждение — на протяжении всего хода расширения. Кроме того, газ одновременно сообщается с горячим и холодным источниками тепла, что вызывает поток тепла от горячего источника к холодному, хотя внутри газа теплопроводность отсутствует. Тем не менее при некоторых условиях работа цикла достаточна для поддержания автоколебаний даже при наличии тормозящей поршень электромагнитной силы, когда он отдает энергию во внешнюю цепь. На T—S-диаграмме рис. 8 цикл изображен пунктиром, он имеет вид колокола.

При составлении уравнений сделано допущение, что по каждому из объемов газа температура распределена равномерно. Она зависит только от времени и устанавливается под действием теплоотдачи через стенки (с одинаковым коэффициентом теплоотдачи α) и изменения объема. Масса газа считается пренебрежимо малой по сравнению с массой поршня, так что импульсом газа пренебрегают. Температуры торцевых и боковых стенок поддерживаются постоянными. Принято, что поршень не обменивается теплом с газом; трение поршня о стенки не учитывается. В задаче возникает естественный масштаб скорости v^* из равенства кинетической энергии поршня и работы сил давления на длине a:

$$\rho_п F L v^* \approx pFa.$$

Система исходных уравнений (энергии, состояния, неразрывности, притока тепла к газу и импульса поршня) имеет вид

$$\begin{aligned}
&\frac{dQ_1}{dt} = C\frac{dT_1}{dt} + p_1\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{\rho_1}\right);\\
&\frac{dQ_2}{dt} = C\frac{dT_2}{dt} + p_2\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{\rho_2}\right);\\
&p_1 = \rho_1 g R T_1; \qquad p_2 = \rho_2 g R T_2;\\
&\rho_1 = \frac{G}{F(a-x)}; \qquad \rho_2 = \frac{G}{F(a+x)}.
\end{aligned} \tag{31}$$

Приняты обозначения: G — масса газа в полости; П — периметр трубы; F — площадь поверхности торца; α — коэффициент теплоотдачи; Q_1, и Q_2 — количества тепла, поступившие через стенки; σ — электропроводность поршня; B — магнитная индукция; η — электрический КПД (отношение напряжения к электродвижущей силе); индексы 1 и 2 соответствуют параметрам газа в различных полостях, индекс п относится к поршню.

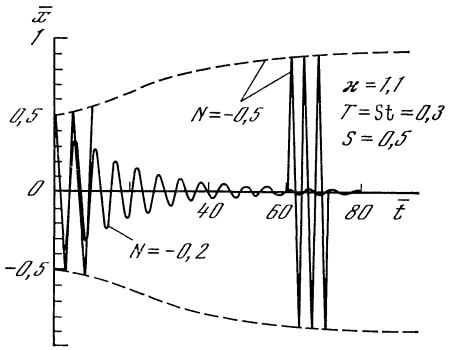
Для перехода к безразмерной форме уравнений в качестве базовых выбраны следующие величины:

$$l^* = a; \quad T^* = T_w; \quad t^* = a/v^*; \quad v^* = \sqrt{\rho_0 R g T_w a/\rho_п L},$$

где ρ_0 — плотность газа в состоянии равновесия. Введены безразмерные величины:

$$N = \frac{\sigma B^2 a(\eta - 1)}{\rho_п v^*}; \qquad \bar{T} = \frac{T_т}{T_w}; \qquad \mathrm{St} = \frac{\alpha}{\rho_0 C v^*}.$$

Численное решение этой системы уравнений в безразмерных переменных показало два возможных пути эволюции колебаний, если в начальный момент поршень отклонить от среднего положения (рис. 11). Если $N = -0{,}2$, то колебания постепенно затухают, как в случае механи-



Р и с. 11. Установление или затухание термоавтоколебаний в схеме рис. 10

ческого или термического трения. Но если параметр $N = -0{,}5$, то при всех остальных одинаковых параметрах колебания нарастают и выходят на незатухающий режим с постоянной амплитудой. Такие колебания, частота которых сама вырабатывается системой, при строго постоянных (а не периодических) внешних воздействиях называются автоколебаниями. Внешний приток энергии, который их поддерживает,— это поток теплоты через цилиндр с газом при нагреве торцов и охлаждении стенок. Имея в виду термическую природу этих колебаний, их можно назвать термоавтоколебаниями.

Принимая $\bar{\omega} \approx 1$, оценим частоту колебаний через масштабную скорость v^*:

$$w = \bar{\omega}\frac{v^*}{a} = \bar{\omega}\sqrt{\frac{\rho_0 g R T_w}{\rho_п L a}}. \qquad (32)$$

Поскольку gRT_w близко к квадрату скорости звука c и принимая $a \approx L$, получаем

$$w \approx \frac{c}{L}\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_п}}.$$

Скорость звука c при температуре горячей стенки может составить 500—600 м/с, а отношение плотностей металлического поршня и газа — около 10^3. В итоге для частоты получается оценка $\omega \sim 20/L$, т. е. при $L \sim 0{,}06$ м $\omega = 300$ рад/с.

Таким образом, приведенное на рис. 10 простое устройство позволяет осуществлять преобразование тепла в механическую работу или электроэнергию в результате возникновения автоколебаний.

КПД η_q определен как отношение энергии, отданной во внешнюю цепь за период колебаний τ, к количеству

тепла, подведенного за этот же период от горячего источника в режиме установившихся колебаний, т. е.

$$\eta_q = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \sigma B^2 V^2 \eta (\eta - 1) SL\, dt \left(\int_{t_0}^{t_0+\tau} \alpha S (T_w - T_1)\, dt \right)^{-1}. \qquad (33)$$

Для примера, показанного на рис. 11, КПД $\eta_q \sim 3\%$, что составляет малую долю от КПД цикла Карно. Но это обстоятельство не лишает подобные устройства практического интереса, поскольку они очень просты и надежны, не имея никаких клапанов и других механизмов.

Вскоре после опубликования работы [17] термоавтоколебания были получены экспериментально [18] и затем использованы, например, для создания насосов в абсорбционных холодильных машинах [19]. В различных термоавтоколебательных насосах роль поршня играет порция жидкости.

В последние годы интерес к подобным двигателям возрос, они привлекают внимание как перспективные устройства для преобразования энергии и получили название диссипативных двигателей [20]. Двигатели эти принципиально необратимы, они находятся в тепловом контакте одновременно с горячим и холодным источниками и никогда рабочее тело диссипативного двигателя не бывает в равновесии с источником тепла или холода. Через торцы цилиндра энергия подводится не только в виде теплоты, но и в виде светового луча, а через стенки производится охлаждение. Кроме того, в некоторых вариантах диссипативных машин допускается химическая реакция в рабочем теле, находящемся в замкнутом объеме. Теоретический предел КПД диссипативных двигателей оценивается в 25%, а 10% считаются вполне достижимой величиной [20].

Таким образом, мы можем заключить, что в диссипативном двигателе происходит передача энергии от потока энтропии к потоку механического импульса, т. е. преобразование потока теплоты частично в механическую мощность. Это проявление оттока энтропии, о котором так красочно говорит М. В. Волькенштейн.

Диссипативный двигатель может служить примером самоорганизации — регулярного движения (колебаний), возникающего из процесса рассеяния энергии. В последние годы появилась целая наука о подобной самоорганизации в природе и технике, названная немецким физи-

ком Г. Хакеном «синергетикой» *. Разумеется, и в этих двигателях доля теплового потока, которую можно преобразовать в механическую мощность, определяется величиной потока эксергии. Вероятно, особый практический смысл приобретут диссипативные двигатели на термоавтоколебаниях в установках для использования возобновляемых источников энергии, в частности в энергетике океана (ОТЭС), о чем речь уже была, и в солнечных прудовых установках, о которых речь пойдет в гл. 8.

Регулярное движение (термоавтоколебания), которое возникает в потоке энтропии,— это простейший пример самоорганизации. Много других примеров можно найти в упоминавшейся книге М. В. Волькенштейна «Энтропия и информация» (в частности, конвективные течения в неоднородно нагретой жидкости). В самой общей постановке разнообразные задачи о возникновении регулярных структур из хаотического движения в настоящее время активно изучаются, по данной проблеме проводятся международные конференции; последняя из них называлась «Хаос-87». Обзор достижений этой области математики, в которой ведущую роль играют труды советских ученых А. Н. Колмогорова и В. И. Арнольда, опубликовал Д. Кампбелл **.

---

* См.: *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986.

** См.: *Campbell D.* Chaos: schto delat? // Nuclear Phys., 1987. Bd. 2. P. 541—562.

Глава 5. Эксергетический КПД

Потому что все оттенки смысла
Умное число передает.

Н. Гумилев

КПД — отношение потоков

Теперь мы подготовлены к тому, чтобы определить меру качества любого преобразователя (точнее, передатчика) энергии: хорошо ли он исполняет свою функцию — передавать энергию от одного носителя другому без потерь, т. е. без роста энтропии, без уменьшения эксергии. Для этого составляется отношение отведенного потока эксергии к подведенному, обозначаемое η_2 (в отличие от η_1, где берется отношение потоков энергии) и называемое эксергетическим коэффициентом полезного действия:

$$\eta_2 = \dot{\varepsilon}_{\text{отв}}/\dot{\varepsilon}_{\text{подв}}, \tag{34}$$

где $\dot{\varepsilon} = \iint_F \delta_\varepsilon \cdot dF$, что приближенно представляется как $\delta_\varepsilon F$ — произведение плотности потока на площадь сечения.

При расчете η_2 самое главное — ясно представить границу системы и обозначить те места, где поток эксергии пересекает эту границу. Обозначив эксергию материальных тел $\dot{\varepsilon}^m$, эксергию теплоты $\dot{\varepsilon}^Q$ и работы $\dot{\varepsilon}^w$, для баланса эксергии имеем

$$(\dot{\varepsilon}^m + \dot{\varepsilon}^Q + \dot{\varepsilon}^w)_{\text{подв}} = (\dot{\varepsilon}^m + \dot{\varepsilon}^Q + \dot{\varepsilon}^w)_{\text{отв}} + \boldsymbol{D}. \tag{35}$$

Здесь точка обозначает производную по времени, т. е. указывает, что речь идет о потоках эксергии в единицу времени, имеющих размерность мощности.

Важнейшую роль здесь играет величина D потерь эксергии внутри системы. Все потери можно представить в виде

$$D = T_0 \Sigma \dot{S}_i, \tag{36}$$

т. е. произведения температуры окружающей среды и суммарного увеличения энтропии внутри системы.

Внешними потерями эксергии называют любую из компонент правой части формулы (35) — в круглых скобках, если она выбрасывается в окружающую среду. В этой связи можно дать самое краткое определение понятию «вторичные энергетические ресурсы»: сбрасываемая эксергия. Символом $\dot{\varepsilon}^w$ здесь обозначен поток электроэнергии или механической энергии, полностью превратимый в работу.

Общее выражение для эксергетического КПД — отношение суммы отведенной к сумме подведенной эксергии:

$$\eta_2 = 1 - D/\dot{\varepsilon}_{\text{подв}}. \tag{37}$$

Основные причины возникновения потерь эксергии D и уменьшения эксергетического КПД уже рассматривались; перечислим их здесь еще раз:

а) теплообмен при конечной разности температур;

б) массообмен при конечной разности концентраций;

в) все виды трения и гидравлического сопротивления, включая трение электронов о нейтральные частицы или кристаллическую решетку (омическое сопротивление проводника);

г) химические реакции в неравновесных условиях;

д) исчезновение магнитного или электрического поля под действием электрического трения.

Частные выражения эксергетического КПД зависят от того, что является полезным действием объекта. Если речь идет о конденсационной электростанции, дающей только электроэнергию в энергосистему, то полезным действием служит работа (в единицу времени, т. е. мощность) проталкивания электрических зарядов против электрического поля, приводящая к повышению электрического потенциала этих зарядов — $\dot{\varepsilon}^w$, а на входе в объект имеется только поток эксергии в материальных телах — подводимом топливе, тогда

$$\eta_2^{\text{КЭС}} = \dot{\varepsilon}^w_{\text{отв}}/\dot{\varepsilon}^{\text{м}}_{\text{подв}}. \tag{38}$$

Для теплоэлектроцентрали, полезное действие которой — производство электроэнергии и теплоты,

$$\eta_2^{\text{ТЭЦ}} = \frac{(\dot{\varepsilon}^w + \dot{\varepsilon}^Q)_{\text{отв}}}{\dot{\varepsilon}^{\text{м}}_{\text{подв}}}. \tag{39}$$

Здесь в числителе вполне правомерно складываются эксергии электричества и теплоты, что приводит к недоразумениям, если складывать не эксергию, а энергию.

Для котельной

$$\eta_2^{\text{кот}} = \dot{\varepsilon}^Q_{\text{отв}}/\dot{\varepsilon}^{\text{м}}_{\text{подв}}, \tag{40}$$

такое же выражение η_2 и для теплового насоса с учетом тепловой электростанции или теплового двигателя, приводящего во вращение компрессор.

Если же тепловой насос использует не теплоту окружающей среды, а сбросное тепло, которое имеет более высокую температуру, но еще недостаточную для практического использования, то

$$\eta_2^{\text{т. н}} = \frac{\dot{\varepsilon}^Q_{\text{отв}}}{(\dot{\varepsilon}^{\text{м}} + \dot{\varepsilon}^Q)_{\text{подв}}}. \tag{41}$$

Энергетическая эффективность электропечи или электротермического технологического устройства оценивается следующим образом:

$$\eta_2^{\text{эп}} = \dot{\varepsilon}^{\text{м}}_{\text{отв}}/\dot{\varepsilon}^w_{\text{подв}}. \tag{42}$$

Наконец, эксергетический КПД химического или металлургического предприятия, потребляющего энергию всех видов,

$$\eta_2^{\text{хм}} = \frac{\dot{\varepsilon}^{\text{м}}_{\text{отв}}}{(\dot{\varepsilon}^{\text{м}} + \dot{\varepsilon}^Q + \dot{\varepsilon}^w)_{\text{подв}}}. \tag{43}$$

Во всех случаях

$$\eta_2 = 1 - \frac{D}{\sum \dot{\varepsilon}_{\text{подв}}}. \tag{44}$$

Для отдельных элементов энергетических установок тоже можно написать η_2, проводя границы системы вокруг каждого элемента. Для турбины

$$\eta_2^{\text{т}} = \frac{\dot{\varepsilon}^w}{\dot{\varepsilon}_{\text{вх}} - \dot{\varepsilon}_{\text{вых}}} \tag{45}$$

($\dot{\varepsilon}^w$ — мощность на валу, $\dot{\varepsilon}_{\text{вх}}$ и $\dot{\varepsilon}_{\text{вых}}$ — эксергии потоков пара на входе и выходе). Для компрессора отношение обратное:

$$\eta_2^{\text{к}} = \frac{\dot{\varepsilon}_{\text{вых}} - \dot{\varepsilon}_{\text{вх}}}{\dot{\varepsilon}^w}. \tag{46}$$

Имеется важное принципиальное различие между эксергетическим КПД для турбины и ее изоэнтропическим (внутренним) КПД.

Исходя из равенства (45), покажем, что при расширении газа в турбине от состояния 1 до состояния 2 должно быть $\dot{\varepsilon}^w = h_1 - h_2$ (мощность равна действительному теплоперепаду). Разность физических эксергий в точках 1 и 2 составляет $h_1 - h_2 - T_0(S_1 - S_2)$, так что

$$\eta_2 = \frac{\Delta h}{\Delta \dot{\varepsilon}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2 - T_0(S_1 - S_2)} = \\ = 1 + \frac{T_0(S_1 - S_2)}{h_1 - h_2 - T_0(S_1 - S_2)}. \quad (47)$$

Изоэнтропический КПД

$$\eta_{из} = \frac{\Delta h}{\Delta h_{из}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2S}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2 - T_{ср}(S_1 - S_2)}. \quad (48)$$

Здесь h_{2S} — энтальпия при изоэнтропическом расширении от состояния 1 до изобары, проходящей через точку 2, а $T_{ср} = (h_2 - h_{2S})/(S_2 - S_1)$ — средняя температура процесса расширения.

Сравнивая обе формулы, видим, что они совпадают только при $T_{ср} = T_0$, что на практике бывает крайне редко. В газотурбинной установке $T_{ср} > T_0$ и $\eta_2 > \eta_{из}$, а в детандере холодильной машины $T_{ср} < T_0$ и $\eta_2 < \eta_{из}$. В МГД-генераторе, где $T_{ср}$ особенно велика, даже при сравнительно низком $\eta_{из}$ величина η_2 остается высокой.

Для простого теплообменника полезным действием является нагрев потока A за счет охлаждения потока B, поэтому

$$\eta_2^{то} = \frac{(\dot{\varepsilon}^Q_{2A} - \dot{\varepsilon}^Q_{1A})}{(\dot{\varepsilon}^Q_{1B} - \dot{\varepsilon}^Q_{2B})}. \quad (49)$$

Поскольку изменение эксергии в числителе и знаменателе при малом изменении температуры каждого из потоков A и B можно представить как произведение передаваемой теплоты и КПД цикла Карно, когда потери теплоты отсутствуют, этот КПД имеет вид

$$\eta_2 = \frac{T_A - T_0}{T_A} \frac{T_B}{T_B - T_0}. \quad (50)$$

Чем больше различие T_A и T_B, тем ниже $\eta_2^{то}$.

Для произвольного теплового двигателя (поршневого или турбины), если его цикл можно представить как получение теплоты $\dot{Q}_г$ при постоянной температуре $T_г$ и выдачу механической мощности $\dot{\varepsilon}^w$, эксергетический КПД

$$\eta_2^{дв} = \frac{\dot{\varepsilon}^w}{\dot{Q}^г(1 - T_0/T_г)}. \quad (51)$$

Для теплового насоса подводимой эксергией является механическая мощность компрессора, а отводимой — эксергия теплоты $\dot{Q}_п$, выделяющейся в конденсаторе при постоянной температуре $T_п$, поэтому

$$\eta_2^{тн} = \frac{1}{\dot{\varepsilon}^w} \dot{Q}_п \left(1 - \frac{T_0}{T_п}\right). \quad (52)$$

Если рассмотреть трансформатор теплоты — систему двигатель — тепловой насос, в которой вся мощность двигателя отдается компрессору, то из равенства (51)

$$Q_{дв} = \frac{\dot{\varepsilon}^w}{\eta_2^{дв}(1 - T_0/T_г)}; \quad Q_п = \eta_2^{т.н} \frac{\dot{\varepsilon}^w}{1 - T_0/T_п}. \quad (53)$$

Отношение теплоты, полученной в тепловом насосе, к теплоте, затраченной в двигателе, называемое коэффициентом первичной энергии, имеет вид

$$КПЭ = \eta_2^{дв}\eta_2^{т.н} \frac{T_п}{T_г} \frac{T_г - T_0}{T_п - T_0}. \quad (54)$$

Если пренебречь потерями эксергии в двигателе и тепловом насосе: $\eta_2^{дв} = \eta_2^{тн} = 1$, то при $T_г = 800$ К, $T_п = 400$ К, $T_0 = 300$ К КПЭ = 2,5. Это означает, что идеальный трансформатор теплоты в сравнении с идеальной котельной ($\eta^{кот} = 1$) потребляет в 2,5 раза меньше топлива при выдаче потребителю одинаковой теплоты. В действительности $\eta_2^д \approx 0{,}7$ и $\eta_2^{тн} \approx 0{,}7$. Их произведение $\sim 0{,}5$ и КПЭ = 1,25. Если же $T_п = 350$ К, то и в этом случае КПЭ = 2,5.

Отсюда видно, что хорошо спроектированный и выполненный трансформатор теплоты может дать существенное снижение расхода топлива по сравнению с котельной. Но для этого потребитель теплоты должен допускать сравнительно малое отличие $T_п$ от T_0 — не более 50—100 К.

Типичные величины η_1 и η_2 приведены ниже:

	η_1	η_2
Водогрейный котел	0,85	0,15
Энергетический котел	0,90	0,50
Тепловая электростанция	0,36	0,34
Электроотопление	0,33	0,05
Тепловой насос	1,2	0,20

На входе в эти системы принят одинаковый поток эксергии органического топлива. Электроотопление и тепловой

насос получают электроэнергию от тепловой электростанции.

Не следует удивляться тому, что у теплового насоса $\eta_1 > 1$, ведь в него втекает поток низкопотенциального тепла, не учтенный при данном расчете, чтобы можно было сравнивать η_1 теплового насоса и водогрейного котла. Это очень важное обстоятельство, оно накладывает отпечаток и на вычисление коэффициента использования энергии для всего энергетического комплекса (учитывать ли приток низкопотенциального тепла из окружающей среды? — см. гл. 9).

Поток эксергии угля и его потери

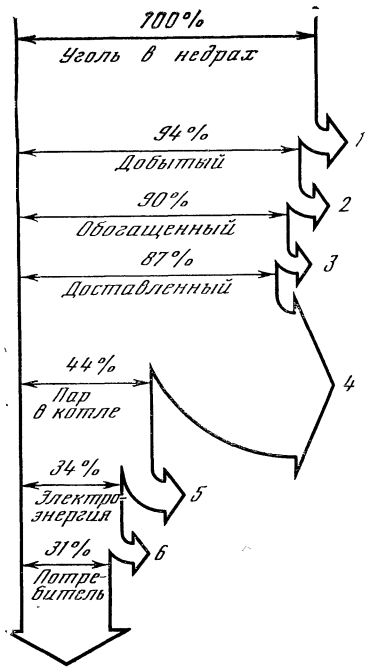
Величина η_1 для котлов весьма высока, что создает иллюзию их высокой энергетической эффективности. На самом деле здесь резервы велики. Это видно из низкой величины η_2, особенно для котла, греющего воду. Потери эксергии только при теплообмене составляют

$$\frac{D}{Q} = \frac{T_г - T_в}{T_г} = \frac{1800 - 400}{1800} = 0{,}78 = 78\%$$

($T_г$ — температура горения, $T_в$ — температура воды в градусах Кельвина). Так велико оказалось термическое трение.

Более подробно проследим за уменьшением эксергии в процессе передачи ее от угля к потоку зарядов в линии электропередачи (рис. 12). Примем за 100% эксергию угля в недрах. Для извлечения и доставки его на поверхность необходим поток электроэнергии к врубовому комбайну и подъемной машине. Электроэнергию получают на электростанции, сжигающей такой же уголь, так что для дальнейшего остается поток эксергии, составляющий в среднем 94%, а 6% — это потери эксергии, обозначенные стрелкой с цифрой *1*. Добытый уголь поступает на обогатительную фабрику, где от него отделяют пустую породу и затем сушат. На это уходит около 4% эксергии (стрелка *2*). Доставка угля по железной дороге с затратой электроэнергии на электровоз требует еще около 3% (стрелка *3*). Разумеется, это цифра ориентировочная. В конкретных проектах учитываются реальные затраты по реальным расстояниям. Из доставленных к электростанции 87% около 2% уходит из котла с дымовыми газами.

Все перечисленные потери — это внешние потери эксергии: они уносятся с материальными потоками либо угля,



Р и с. 12. Эксергетическая диаграмма преобразования эксергии угля в электроэнергию

либо нагретых газов. Но почти половина оставшегося потока эксергии (43%) — это внутренние потери эксергии. Они связаны только с химическим и термическим трением, т. е. возрастанием энтропии в процессе горения топлива и передачи энергии от горячих газов к водяному пару в котле (стрелка *4*).

В потоке пара, поступающем в турбину, осталось 44% эксергии. Из них около 10% (стрелка *5*) потрачено в турбине и электрическом генераторе и 34% поступило в поток электрических зарядов, несущих электроэнергию. Из них в среднем 3% теряется в линиях электропередач (стрелка *6*) как высокого, так и низкого напряжения и 31% приходит к каждому из нас в квартиру.

Если же мы включаем в розетку электрокамин, дающий на выходе теплый воздух, то в нем, конечно, вся подведенная электроэнергия преобразуется в теплоту, но эта теплота крайне низкой температуры, в которой эксергия очень мала. На выходе из электрокамина мы получаем не более 3% эксергии, содержавшейся в угле. Вот каким расточительным является электроотопление. Поэтому оно на практике распространено очень мало и для его оправдания нужны специальные обстоятельства.

Тепловой насос

Есть ли альтернатива электроотоплению, когда мы хотим в качестве источника энергии использовать только электроэнергию, т. е. когда котельная или теплоэлектроцентраль недопустимы по каким-либо причинам, скажем из-за дыма или других экологических требований? Да, есть — мы уже о ней говорили — это тепловой насос.

Теперь мы можем детально проиллюстрировать рабочий процесс теплового насоса, питаемого электроэнергией от тепловой электростанции. Для этого воспользуемся эксергетической диаграммой, показанной на рис. 13. Она подобна диаграмме рис. 12, но здесь все процессы тепловой электростанции и полное уменьшение эксергии в ней показаны упрощенно в виде прямой линии — от 100% на входе до 36% на выходе из ТЭС. Штриховкой показан поток эксергии в каждом из элементов теплового насоса, а цифры — это и есть эксергетический КПД в процентах по отношению к эксергии топлива на ТЭС. Незаштрихованная часть ниже оси дополняет величину потока эксергии до потока энергии.

Описание рабочего процесса теплового насоса мы не повторяем, так как оно уже было приведено ранее (в связи с рис. 2). Напомним лишь, что процесс *1—2* на диаграмме *T—S* (температура—энтропия) — это сжатие фреона в компрессоре КМ, процесс *2—3* — это охлаждение и конденсация паров в конденсаторе К, *3—4* — охлаждение жидкого фреона в охладителе конденсата ОК, *4—5* — сброс давления в дросселе ДР и *5—1* — испарение в испарителе И.

Как видно из диаграммы, поток отведенной потребителю эксергии — сумма 15,5% в конденсаторе и 4,7% в охладителе конденсата, т. е. 20,3%. Это в 3—4 раза больше, чем в греющем воду электрокотле. Полный поток энергии, подведенный потребителю с учетом теплоты из окружающей среды, составляет 116,7% по отношению к теплоте сгорания топлива, сожженного на ТЭС для питания теплового насоса.

Если бы вместо системы ТЭС—тепловой насос здесь использовалась котельная, то даже крупная котельная дала бы потребителю не более 85% теплоты сгорания топлива. Так что здесь налицо пониженный расход топлива, составляющий 85 : 116,7 = 72,5% от котельной, или экономию 27,5% топлива.

Для сравнения можно привести схему энергоснабжения крупного промышленного предприятия, где за 100% принята сумма потоков энергии, подводимых к ТЭС и котельной предприятия (рис. 14). Это традиционная схема энергоснабжения. Вся теплота, подводимая от котельной (31%), идет на отопление здания и теряется через стены и с уходящим вентиляционным воздухом. Электрическая мощность от электростанции (24%) превращается в двигателях и станках почти полностью в теплоту низкой темпе-

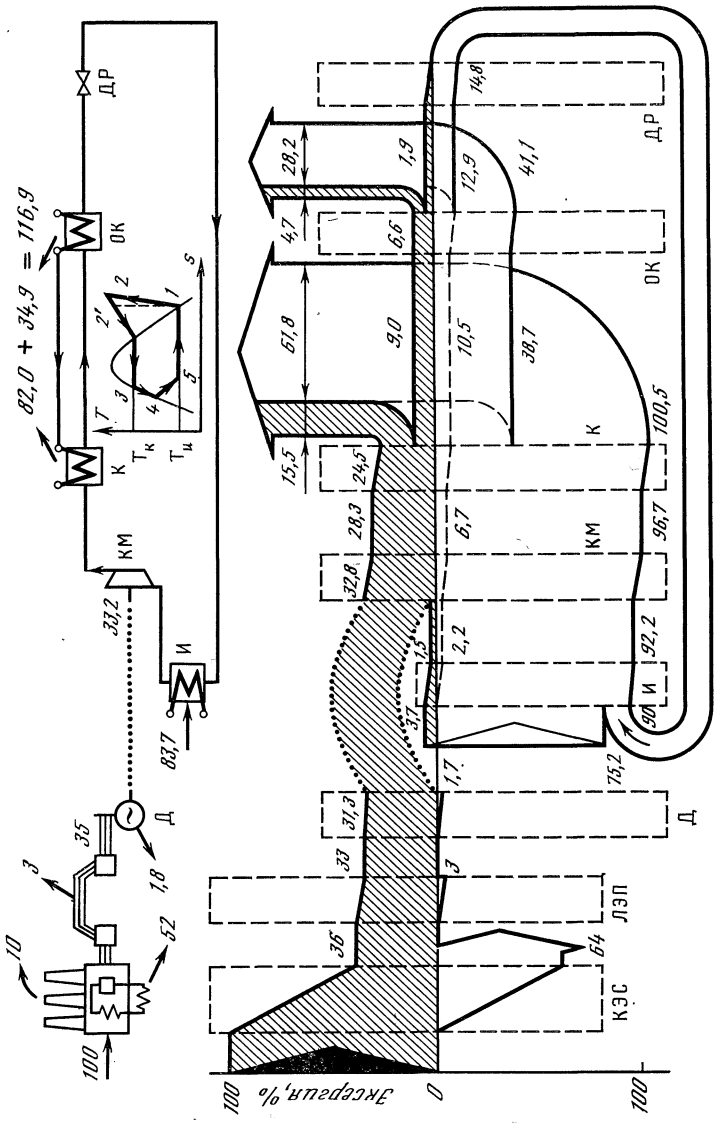
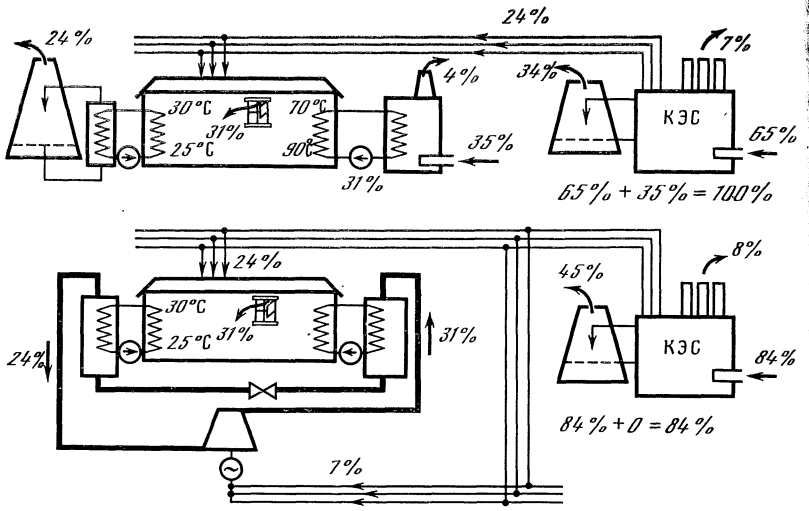


Рис. 13. Эксергетическая диаграмма теплонасосной станции (вверху — ее термодинамическая схема и цикл)



Р и с. 14. Схема теплового насоса для отопления завода (вверху — традиционная схема с котельной и градирней)

ратуры в охлаждающей воде, которая отводится в атмосферу в градирне.

На нижнем рисунке показано применение здесь теплового насоса. Он фактически возвращает теплоту из оборотной системы водоснабжения (24%), поскольку она вся в сумме с электроэнергией, затраченной на сжатие фреона (7%), поступает на вход, т. е. на отопление здания, отчего котельная ликвидируется. Как видно из схем, теплонасосный вариант потребляет всего лишь 84% топлива по сравнению с традиционной схемой, т. е. 16% топлива здесь экономится.

Таким образом, и здесь тепловой насос как имеющий более высокий эксергетический КПД приводит к возможности существенной экономии топлива.

Теплота и холод

Рассмотрим теперь комбинированную, т. е. совместную, выработку теплоты и холода. Ее производит обычная холодильная машина, когда теплоту конденсации не выбрасывают, а подают какому-либо потребителю для полезного использования. Либо, что то же самое, ее производит теплонасосная установка, когда холодную воду после испарителя не выбрасывают, а подают потребителю холода.

Очевидно, что такое использование действующей установки должно приводить к повышению ее энергетической эффективности, поскольку здесь отведенной полезной эксергией является сумма эксергий теплоты $\dot{Q}_г = (T_г - T_0)/T_г$ и холода $\dot{Q}_х (T_0 - T_х)/T_х$. Эксергетический КПД принимает вид

$$\eta_\varepsilon = \frac{1}{\dot{\varepsilon}^w}\left(\dot{Q}_г \frac{T_г - T_0}{T_г} + \dot{Q}_х \frac{T_0 - T_х}{T_х}\right), \qquad (55)$$

где $\dot{\varepsilon}^w$ — мощность компрессора. В этой формуле фигурируют три температурных уровня: $T_г$, T_0 и $T_х$. Возникает естественный вопрос: как связан с η_ε эксергетический КПД η_2 для двухтемпературного теплового насоса, работающего в интервале температур $T_г$ и $T_х$:

$$\eta_2 = \frac{\dot{Q}_г}{\dot{\varepsilon}^w}\frac{T_г - T_х}{T_г}.$$

Здесь в числителе — эксергия теплового потока, отданного тепловым насосом потребителю, а в знаменателе — мощность компрессора. Принимая во внимание очевидное равенство $\dot{Q}_г = \dot{Q}_х + \dot{\varepsilon}^w$ (закон сохранения энергии), получаем

$$\eta_\varepsilon = \eta_2 \frac{T_г - T_0}{T_г}\frac{T_г}{T_г - T_х} + \left(\eta_2 \frac{T_г}{T_г - T_х} - 1\right) \times \frac{T_0 - T_х}{T_х} = 1 - (1 - \eta_2)\frac{T_0}{T_х}.$$

Поскольку всегда $T_0 > T_х$, получается $\eta_\varepsilon < \eta_2$, т. е. эксергетический КПД трехтемпературной установки всегда меньше, чем двухтемпературной при том же интервале $T_г$ и $T_х$.

Мы видим, как число — эксергетический КПД η_2 — действительно указывает практике, где энергия передается без потерь, а где весьма несовершенно. Именно там, где число мало́ (как, например, 0,03 в случае электроотопления), есть большие резервы для экономии энергии. Поэтому Американское физическое общество в 1975 г. предложило вместо КПД по балансу энергии η_1 повсеместно применять новый критерий энергетической эффективности — отношение теоретически минимальных затрат энергии к фактическим, что близко́ величине η_2.

КПД по энергии и по эксергии

Ниже приводится простой пример расчета КПД для идеализированной схемы энергетической установки (рис. 15). Это комбинированная установка, способная выдавать потребителю электрическую и тепловую энергию, потребляя природный газ. Полную схему можно рассматривать как последовательное усложнение трех вариантов.

I. Имеется только котел (ПВК), который нагревает сетевую воду, — схема простейшей котельной.

II. Перед котлом включается газотурбинная установка, состоящая из компрессора К, газовой турбины ГТ и камеры сгорания, куда подается метан CH_4 и воздух из компрессора. В отличие от обычного котла в схеме I, в схеме II используются газы после газовой турбины, имеющие более низкую температуру, но более высокую скорость. Они проходят котел-утилизатор КУ и выбрасываются через дымовую трубу ДТ. Эту схему называют предвключенной ГТУ.

III. Между ГТУ и подогревателем сетевой воды включается паросиловая установка ПСУ, в которую поступают газы после ГТУ. В котле-утилизаторе получается энергетический пар высокого давления, поступающий в турбину Р, после которой давление пара выше атмосферного. Конденсация пара в сетевом подогревателе СП нагревает воду, подаваемую потребителю, которую при надобности можно еще догреть в пиковом котле ПВК. На рис. 15 полная схема III приведена с указанием характерных температур.

Теперь вычислим для всех трех схем величины КПД по балансу энергии η_1 и эксергии η_2, а также $\eta_{эл} = N_{эл}/Q_{топл}$ — КПД по электрической мощности.

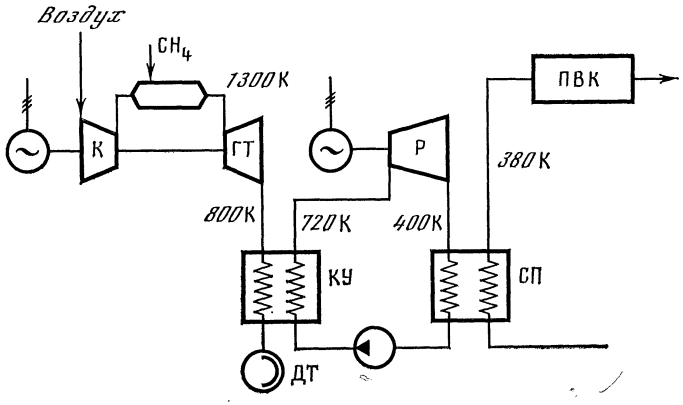
I. Схема котельной с известными типичными величинами: $\eta_{эл} = 0$; $\eta_1 = 0{,}85$; $\eta_2 = 0{,}85 \cdot (380 - 270)/380 = 0{,}25$ (здесь и далее температура окружающей среды $T_0 = 270$ К).

II. Схема предвключенной ГТУ, имеющая $\eta_{эл} = \eta_1^{ГТУ} = 0{,}28$.

Как правило, котел утилизатор КУ имеет КПД ниже, чем обычный котел ($\eta_1^{КУ} = 0{,}65$), и

$$\eta_1^{II} = 0{,}28 + (1 - 0{,}28) \cdot 0{,}65 = 0{,}75,$$

$$\eta_2^{II} = 0{,}28 + (1 - 0{,}28) \cdot 0{,}65 \cdot (380 - 270)/380 = 0{,}416.$$



Р и с. 15. Схема комбинированной парогазовой установки

III. Схема ГТУ—ПСУ—СП. Для нее

$$\eta_1^{III} = \eta_1^{ГТУ} + (1 - \eta_1^{ГТУ})\,\eta^{ПСУ}\eta^{КУ} + (1 - \eta^{ГТУ})(1 - \eta^{ПСУ})\,\eta^{КУ},$$

а $\eta_{эл}$ — сумма двух первых членов.

Сохраняем все величины частных КПД прежними.

Следует определить только возможный КПД паросиловой установки $\eta^{ПСУ}$. Поскольку из опыта создания ПСУ хорошо известны величины их эксергетического КПД $\eta_2^{ПСУ} = 0{,}6$, можно вычислить $\eta^{ПСУ}$ как $\eta^{ПСУ} = 0{,}6 \cdot (720 - 400)/720 = 0{,}265$ через указанные на схеме температуры. Тогда

$$\eta_1^{III} = 0{,}28 + 0{,}72 \cdot 0{,}65 \cdot 0{,}265 + 0{,}72 \cdot 0{,}735 \cdot 0{,}65 = 0{,}744;$$

$$\eta_2^{III} = 0{,}28 + 0{,}124 + 0{,}34 \cdot (380 - 270)/380 = 0{,}50.$$

Запишем все величины КПД в виде таблицы:

	$\eta_{эл}$	η_1	η_2
I	0	0,85	0,25
II	0,28	0,75	0,416
III	0,404	0,744	0,50

Отсюда можно сделать следующие выводы. По мере совершенствования установки и увеличения выдачи ею электрической мощности КПД по балансу энергии η_1 падает. Очевидно, что он не может характеризовать степень совершенства установки. Скажем, если бы за повышение

КПД платили премии (что в принципе вполне разумно и в несколько иной форме — за снижение удельного расхода топлива — применяется на практике) и КПД вычисляли бы как η_1, то весь персонал был бы против перехода от схемы I к схеме III, хотя для народного хозяйства такой переход был бы выгоден.

Действительную полезность реконструкции отражает эксергетический КПД η_2, который растет по мере усложнения установки, характеризует снижение затрат первичной энергии и показывает возможности энергосбережения. Пример иллюстрирует трудности, возникающие при сложении в числителе КПД электроэнергии и теплоты. Получается результат, явно противоречащий и здравому смыслу, и задаче энергосбережения, если оценивать совершенство установки по η_1. Если же складывать эксергию теплоты с электроэнергией, то все численные оценки действительно растут с ростом энергетической эффективности. Таким образом, можно заключить, что η_2 и есть то «умное число», которое передает все оттенки смысла.

Однако есть предел роста η_2, который выявляется при учете не только текущих затрат эксергии, но и прошлых — на создание установки. При чрезмерно высоких η_2 требуются теплообменники огромных размеров и затраты эксергии на их создание могут превысить выигрыш от роста η_2 (об этом — ниже, в гл. 7).

Глава 6. Диаграммы потоков эксергии

Увидел то, чего не видит
иной вооруженный глаз.

Л. Мартынов

Компоненты потоков

П. Л. Капица обращал внимание на необходимость своевременной и правильной оценки эффективности энергетических проектов, особенно в тех случаях, когда речь идет о новом направлении в энергетике, где еще нет практического опыта. Важным параметром он считал модуль вектора Умова—Пойнтинга, характеризующий плотность потока преобразуемой энергии. В тех случаях, когда плотность потока энергии достаточно велика, реализация соответствующей преобразующей установки возможна. Если же эта плотность мала, размеры установки получаются чрезмерно большими [21].

В качестве примера П. Л. Капица приводил предложение о широком применении электростатических генераторов электроэнергии, которое не прошло из-за того, что в них плотность потока энергии на четыре порядка ниже, чем в обычных электромагнитных генераторах. Низкая плотность потока энергии (порядка сотни ватт на 1 м^2) во многих случаях не позволяет использовать возобновляемые источники энергии.

Все эти соображения несомненно важны, но их применение на практике при рассмотрении различных проектов требует наличия более или менее четких численных критериев: что допустимо, а что — нет, где граница приемлемой плотности потока энергии, которая может отличаться от традиционных вариантов не в 10^4, а, скажем, в 100, 10 или даже 2 раза? Как в этом случае судить о приемлемости предложения?

Обычно для ответа на подобные вопросы производится технико-экономический расчет с определением приведенных затрат на получаемую энергию. Чрезмерные размеры установок проявляются в их дороговизне и недопустимых приведенных затратах. Для расчета возможного энерго-

сбережения более четкий ответ может дать чисто термодинамический подход — сопоставление полученной и затраченной энергии (см. гл. 7). Но для выяснения многих физических причин чрезмерных затрат энергии, в том числе и на создание самого объекта, необходимо привлечь те самые понятия, которых не было в термодинамике равновесных процессов и которые мы обсуждали в гл. 1 и 2. Речь идет о потоках работы, теплоты и вещества и их эксергии $\dot{e}^w$, $\dot{e}^Q$, $\dot{e}^м$.

Для рассмотрения потоков равновесная термодинамика не пригодна. Упомянутые потоки составляют предмет важного раздела физики XX века — неравновесной термодинамики (или термодинамики необратимых процессов).

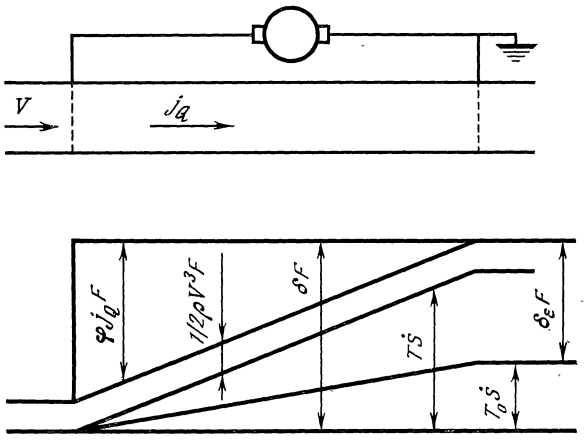
Плотность потока энергии определяет размеры технических устройств, что, в свою очередь, сильно влияет на затраты энергии, необходимые для создания устройства. Есть ли способы сделать потоки наглядными?

Наиболее наглядно потоки энергии, эксергии и их носителей — заряда, вещества и энтропии — характеризуются диаграммами, которые представляют собой дальнейшее развитие обычных эксергетических диаграмм (см., например, рис. 12) о потоке эксергии в системе шахта—электростанция или (изображено на обложке этой книги) о потоке энергии и эксергии в солнечном пруде. На практике в большинстве случаев все потоки стационарны, т. е. скорости всех носителей энергии постоянны во времени; такое допущение будет всегда вводиться.

Электрокотел

Рассмотрим электрический нагрев потока воды (электрокотел), т. е. передачу энергии от потока электрических зарядов потоку термического заряда — энтропии (рис. 16). Это изолированная труба постоянного сечения F — через ее стенки нет никаких потоков. Внутри течет вода, проходя через две металлические сетки-электроды, к которым приложено напряжение от внешнего источника, например электрического генератора. Вода проводит электрический ток плотностью j_q и нагревается.

На диаграмме рис. 16 показан полный поток энергии сквозь трубу δF и его составляющие. Здесь уже знакомый нам поток электроэнергии $\varphi j_q F$, который линейно уменьшается вдоль трубы из-за уменьшения φ. На правом заземленном электроде $\varphi = 0$. Вода считается несжимаемой и некипящей, поэтому ее скорость и кинетическая энергия не изменяются. Но энергия электрических зарядов передается потоку энтропии, поэтому температура нарастает соответственно падению φ. В потоке рождается энтропия и эксергия существенно уменьшается.



Р и с. 16. Поток энергии и эксергии в электрокотле

МГД-генератор

Теперь рассмотрим построение полной эксергетической диаграммы для энергетического МГД-генератора вместе с его камерой сгорания, соплом и каналом *. И в этом случае считаем, что течение газов происходит в прямой трубе переменной площади сечения F с идеально изолированными стенками, через которые никакие потоки не проходят. В силу идеальной изоляции полный поток энергии через каждое сечение канала сохраняется одинаковым.

Но поток эксергии вдоль канала уменьшается, а потери эксергии нарастают при каждом акте передачи энергии от одного энергоносителя другому. В силу предположения об абсолютной изоляции стенок канала здесь имеются только внутренние потери эксергии, тогда как в любом реальном объекте должны быть еще и внешние потери эксергии, например с охлаждающей стенки водой.

---

* *Янтовский Е. И., Толмач И. М.* Магнитогидродинамические генераторы. М.: Наука, 1972.

Показатель термодинамического совершенства процесса передачи энергии — эксергетический КПД — записывается как отношение потока эксергии $\delta_\varepsilon F$ на выходе из канала к потоку на входе. По балансу энергии в этом случае КПД теряет смысл, ибо он равен единице в любом сечении канала. Расчет эксергетического КПД, начиная от месторождений топлива, является существенным элементом эффективности объекта, мы обсуждали его в гл. 5, а здесь расскажем о его вычислении по диаграмме.

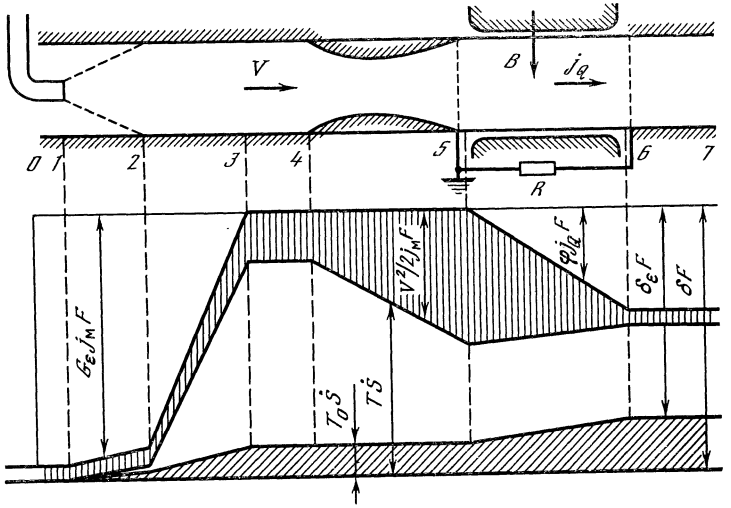
На рис. 17 показана схема первого из вариантов и соответствующая эксергетическая диаграмма.

В начальном сечении 0 в канал подается изотермически сжатый воздух (или другой окислитель). Его давление обеспечивает поток импульса в канале, температура принята за температуру окружающей среды T_0, а энтропия — за точку отсчета. Через малую трубку введен поток горючего с химическим потенциалом g. Поток энергии в сечении 0 складывается из химической энергии горючего и кинетической энергии воздуха. В сечении *1* начинается смешение горючего с окислителем, горение и повышение температуры. Химический потенциал понижается, так как в процессе горения изменяется химический состав газов. Возрастает скорость течения и начинается рост энтропии. В сечении *2* заканчивается смешение, повышается интенсивность горения.

В сечении *3* горение заканчивается, химический потенциал исчезает, но увеличивается поток теплоты TS и кинетической энергии $\rho V \cdot \frac{V^2}{2}$. В сечении *4* начинается изоэнтропическое расширение газов в сопле Лаваля, отчего растет скорость и кинетическая энергия за счет снижения температуры T и потока энтальпии TS. Поток энтропии S не изменяется.

Канал МГД-генератора тоже имеет вид трубы, набранной из отдельных металлических колец с изоляционной прослойкой. Поперек канала действует постоянное магнитное поле B от внешнего магнита. Постоянное магнитное поле, конечно, проникает внутрь канала, но никакой работы производить не может, поэтому трубу мы считаем, как и в предыдущих примерах, идеально изолированной от внешней среды.

Внутри канала протекает сильно нагретый газ с добавлением легко ионизирующейся присадки (калия или цезия), которая дает много электронов и ионов. На входе в канал и выходе из него имеются электроды, подсоединенные к потребителю электроэнергии. Электроды могут быть сеточными или кольцевыми — это в данном случае значения не имеет.



Р и с. 17. Эксергетическая диаграмма МГД-генератора со сверхзвуковым течением на входе

Поток энергии на входе в канал состоит из двух частей — кинетической $\rho \frac{V^3}{2} F$ и энтальпии TS. Магнитное поле в канале заставляет электроны сильно отставать от потока газа, поскольку они стремятся вращаться вокруг силовых линий. Каждый электрический заряд стремится вращаться под действием так называемой силы Лоренца, но ионы имеют массу, в несколько тысяч раз бóльшую, чем электроны, и их путь поле искривить не может. Ионы практически не отстают от потока газа. Можно сказать, что магнитные силовые линии, подобно щетке, вычесывают электроны из газа, пропуская поток газа с ионами. Поэтому на входе в канал происходит скопление электронов, а на выходе — скопление ионов. Возникает сильное продольное электрическое поле, и вдоль канала нарастает электрический потенциал φ. Сила, создающая это поле и разделяющая заряды, называется холловской электродвижущей силой. Она вызывает ток в замкнутой цепи, состоящей из потока газов, электродов, проводов и сопротивления нагрузки — потребителя. Схема генератора тоже называется холловской. Кроме продольного тока

j_{qx}, в канале есть и поперечная компонента j_{qy}, отчего появляется механическая сила, тормозящая поток газа. Скорость и кинетическая энергия уменьшаются, хотя полный поток вещества ρVF и поток энергии δF остаются неизменными вдоль канала. По мере падения V кинетическая энергия передается потоку электрических зарядов благодаря росту φ, так что $\varphi j_{qx}F$ вдоль канала нарастает, а полный ток $I = j_{qx}F$ остается неизменным. Поток энтропии растет из-за джоулева тепловыделения, но температура изменяется незначительно.

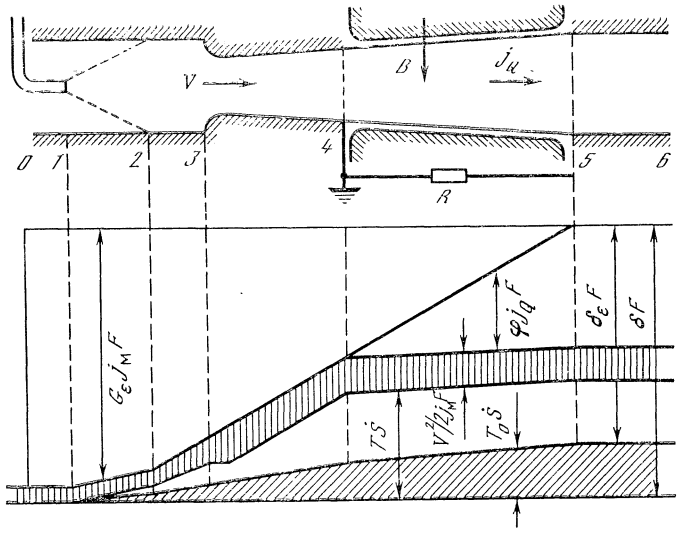
В сечении *6* полученная электрическая мощность отводится к сопротивлению R (потребителю), где падает генерированный потенциал, а ток I снова вводится в канал в сечении *5*. В сечении *7* проходит поток газов, энергию которого можно использовать в хвостовой установке (например, паротурбинной). Штриховкой показан поток потерь эксергии $T_0\mathcal{S}$, совпадающий по форме с графиком потока энтропии $\mathcal{S}$, поскольку $T_0 = \text{const}$. Поток эксергии $\delta_\varepsilon F$ равен потоку энергии δF за вычетом указанных потерь $T_0\mathcal{S}$.

Установка сверхзвукового сопла перед МГД-каналом, т. е. предварительное преобразование энтальпии в кинетическую энергию, бывает нерациональна, и возможны схемы с расширением газов непосредственно в МГД-канале, в том числе и с догоранием в нем горючего (при дозвуковой скорости). Этот вариант схемы показан на рис. 18, где все обозначения такие же, как на рис. 17. На диаграмме видно, что химическая энергия топлива в канале непосредственно преобразуется в электрическую: уменьшается G и соответственно нарастает φ.

Обычно эксергетические диаграммы содержат только полосу энергии и эксергии.

Как видно из рис. 15—18, полные эксергетические диаграммы с указанием изменения составляющих потока эксергии более наглядны и информативны, они позволяют легче установить причины роста энтропии и внутренних потерь эксергии в энергетических установках. Применение диаграмм передачи энергии на тепловой электростанции (от топлива к потоку энтропии в котле, потоку импульса в турбине и потоку зарядов в ЛЭП) позволило бы сделать и этот сложный процесс более наглядным, в том числе при изображении на экранах пультов управления.

Рассмотренные примеры иллюстрируют передачу энергии от одного носителя другому, сопровождаемую ростом энтропии и падением эксергии. Иногда говорят, что энер-



Р и с. 18. Эксергетическая диаграмма МГД-генератора с догоранием в канале

гия — это один и тот же всадник, который в преобразующих устройствах только меняет лошадей. На рис. 17 и 18 показано, как это происходит, как исчезает одно слагаемое в формуле (*1*) и появляется другое. Можно сказать, что поток энергии, сохраняясь по величине, передается от одного энергоносителя другому и при этом теряет способность производить работу, т. е. энергия подвергается деградации (обесценивается).

Диаграммы действительно позволяют увидеть то, что увидеть трудно даже вооруженному глазу — весь процесс передачи энергии и эксергии, и указать реальные, а не иллюзорные источники потерь для принятия соответствующих решений.

При использовании современных ЭВМ можно выводить на дисплей результаты расчета потоков энергии в газопроводе, на тепловой электростанции, в теплоснабжении, основанные на решении полной системы уравнений сохранения массы, импульса и энергии.

Глава 7. Эксергия-нетто

Я благоговейно поднимаю брошенную гайку на улице, потому что мускульно ощущаю количество затраченной на нее работы...

Л. М. Леонов

История объекта

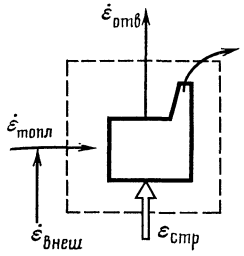
Термин «эксергия-нетто» обозначает новое и важное понятие в энергетических расчетах. Чтобы его пояснить, скажем сначала, что такое «энергия-брутто». Это не поток энергии, а все количество энергии, которое выдал какой-либо энергетический объект, электростанция, котельная и т. п. Но сам этот объект появился не по волшебству. Чтобы его создать, было затрачено много энергии, да и в процессе эксплуатации, например на добычу и доставку топлива, тоже расходуется энергия (а теперь мы знаем, что правильнее говорить — расходуется эксергия).

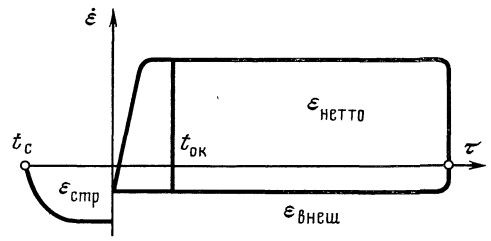
Энергия-нетто — это полное количество полученной энергии за вычетом ее затрат на создание объекта и его обслуживание. Соответственно эксергия-нетто — это полученная эксергия за вычетом ее затрат [23].

Для ее расчета следует обобщить составление баланса потоков эксергии, которые проходят через границу, т. е. воображаемую оболочку, окружающую наш объект. В самом деле, учитывая в этом балансе только потоки энергии за единицу времени (имеющие размерность мощности), мы забываем о том, что сам объект когда-то попал внутрь оболочки. До начала строительства там ничего, кроме атмосферы и грунта, не было. Когда началось создание объекта, через граничную поверхность были введены потоки эксергии, заключенной в строительных материалах, выплавляемом металле и т. п.

Чтобы учесть все потоки эксергии, надо рассматривать историю объекта начиная от первых затрат эксергии и сделать расчет этих затрат.

Проиллюстрируем это на примере тепловой электростанции (рис. 19). На схеме стрелками показаны: $\dot{\varepsilon}_{отв}$ — поток электроэнергии, отводимой от станции, $\dot{\varepsilon}_{топл}$ —





Р и с. 19. Потоки эксергии через контрольную поверхность вокруг электростанции

Р и с. 20. Изменение затраченной и полученной эксергии во времени

поток эксергии с топливом и $\dot{\varepsilon}_{внеш}$ — затраты на добычу и доставку топлива. Точки над буквой обозначают, что это потоки за единицу времени. Кроме них, показана $\varepsilon_{стр}$ — полная величина эксергии, затраченной на строительство и оборудование.

Здесь

$$\eta_2 = \frac{\dot{\varepsilon}_{отв}}{\dot{\varepsilon}_{топл} + \dot{\varepsilon}_{внеш}}. \qquad (56)$$

Историю объекта во времени можно наглядно изобразить на графике (рис. 20), где по горизонтальной оси отложено время (годы), а по вертикальной — потоки эксергии через границу вокруг объекта. В момент t_c началось строительство и полный поток эксергии отрицателен — он направлен только внутрь границы. Площадь над этой частью кривой и есть $\varepsilon_{стр}$.

В момент времени $t = 0$ создание объекта завершено и с пуском первого агрегата начинается выдача эксергии $\dot{\varepsilon}_{отв}$ потоком электрических зарядов, т. е. электроэнергии. Через время $t_{ок}$ полученная эксергия скомпенсирует затраты (площадь над осью координат сравняется с $\varepsilon_{стр}$) и начнется поступление в энергосистему потока эксергии-нетто.

Наконец, через время τ электростанция работу прекращает, срок ее службы заканчивается и за этот срок она выдает $\dot{\varepsilon}_{отв}\tau$ — такое количество электроэнергии. Отношение всей полученной эксергии к затраченной на строительство и оборудование называется коэффициентом эксергии-нетто:

$$K_\varepsilon = \dot{\varepsilon}_{отв} \cdot \tau / \varepsilon_{стр}. \qquad (57)$$

Он вычислен уже для многих энергетических объектов. Так, например, для тепловых электростанций $K_\varepsilon = 5 \div 7$, а для газовых промыслов 60—70, но с учетом строительства газопроводов он, конечно, во много раз меньше.

Эксергетический прейскурант материалов

Основная проблема в расчете K_ε состоит в определении $\varepsilon_{стр}$. Она облегчается тем, что в большинстве случаев все затраты эксергии связаны с получением материалов — стали, меди, пластмасс, бетона и т. п. Поэтому, как правило, $\varepsilon_{стр}$ вычисляется как масса каждой детали, умноженная на полные удельные затраты эксергии на изготовление материала, с учетом добычи и обогащения руды, плавки металла, проката и т. п.

Такой энергетический «прейскурант» приведен на рис. 21. На левой шкале показана полная энергоемкость (в МДж на 1 кг материала), на правой шкале — безразмерное отношение, показывающее, сколько килограммов топлива нужно сжечь, чтобы получить 1 кг указанного материала или вещества. (Чтобы не называть конкретного топлива с его меняющейся теплотой сгорания, в энергетике введено понятие условного топлива, имеющего теплоту сгорания 29,3 МДж/кг.)

Указанные в «прейскуранте» ориентировочные энергетические «цены» материалов подвержены двум противоположным тенденциям. С одной стороны, они снижаются благодаря техническому прогрессу в горной, металлургической и химической промышленности, но, с другой — повышаются из-за того, что исходное сырье и руды становятся все беднее. В целом эти величины довольно стабильны и в этом смысле они гораздо надежнее, чем цены денежные.

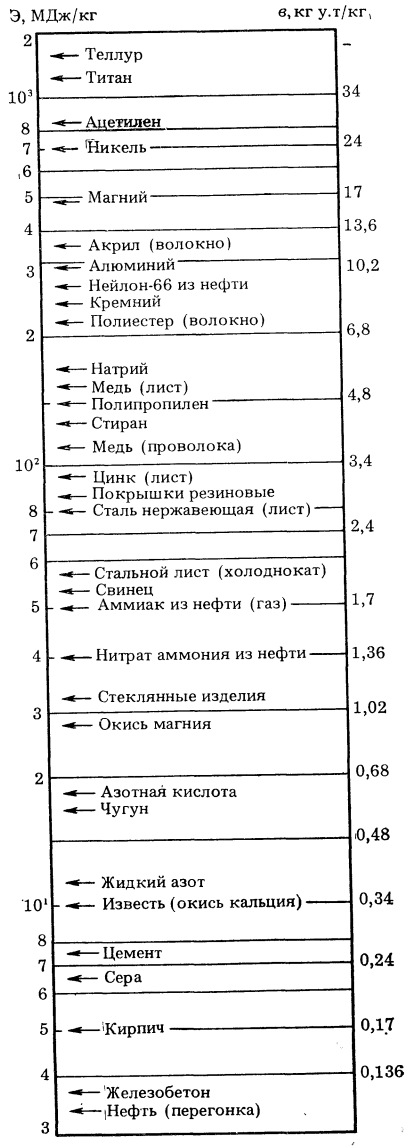
Затраты энергии на добычу и выплавку металла находятся в естественной и сильно падающей зависимости от его содержания в добываемой из недр земли горной массе. На рис. 22 показана зависимость энергоемкости некоторых металлов от их концентрации. Очевидно, что наиболее распространенные конструкционные металлы — железо и алюминий — занимают правый нижний угол, а драгоценный металл — золото — левый верхний. В высокой цене золота не последнюю роль играют большие затраты энергии на его добычу.

Обе упомянутые тенденции — снижение затрат энергии за счет технического прогресса и возможный рост

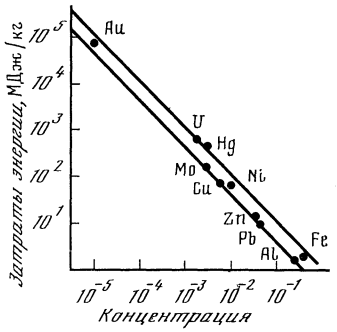
за счет обеднения руды — можно проиллюстрировать рис. 23 и 24 [25]. На рис. 23 показано снижение затрат электроэнергии на выплавку 1 кг алюминия за 100 лет — с 1880 по 1980 г. Как видно из графика, они снизились примерно в 3 раза — с 50 до 16 кВт·ч, но дальнейшее снижение маловероятно, поскольку уже близок теоретический минимум, определяемый по балансу эксергии химической реакции восстановления алюминия из его окисла.

Для оценки тенденций в энергоемкости производства меди приведем данные о ее зависимости от концентрации меди в руде (рис. 24). Поскольку, например, в США средняя концентрация меди в руде с 1920 до 1980 г. уменьшилась от 2 до 0,4%, это должно было бы привести к повышению энергозатрат от 16 до 50 МДж/кг. Поэтому, несмотря на технический прогресс, тенденция обеднения руды фактически за последние 20 лет привела к росту энергозатрат на получение меди.

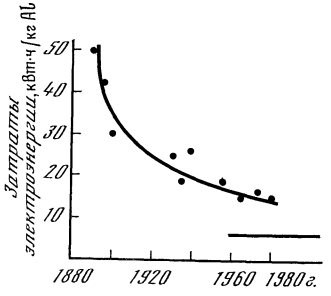
В структуре энергозатрат компоненты $\varepsilon_{внеш}$ значительную долю занимают транспортные расходы. Ниже приводится расход условного топлива (кг на 1000 т·км) по раз-



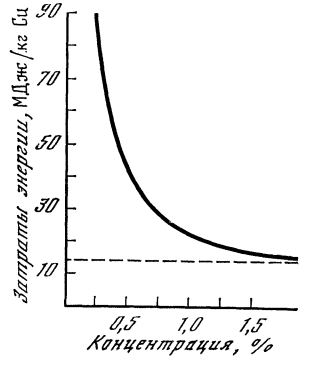
Р и с. 21. Энергетический прейскурант материалов



Р и с. 22. Зависимость энергозатрат на получение металлов от их концентрации в недрах



Р и с. 23. Снижение энергозатрат на получение алюминия по годам (прямая линия — теоретический минимум)



Р и с. 24. Энергозатраты на получение меди при разной концентрации руды (пунктирная линия — затраты на плавку и рафинирование)

ным видам транспорта на 1980 г.:

Железнодорожный	8,3
Морской	10,3
Речной	11,4
Автомобили грузовые	144,1
Газопроводный	66,5
Нефтепроводный	5,5

За исключением автомобилей, где еще возможно увеличение дизелизации, эти показатели вряд ли могут существенно улучшиться в перспективе. Для расчетов $\varepsilon_{внеш}$ следует учесть, что здесь указан расход условного топлива на перевозку натурального груза, поэтому при оценке доли условного топлива, идущего на транспорт, необходимо приведенный показатель увеличить примерно в 1,5 раза в случае угля и уменьшить в таком же отношении для нефти и газа. Следовательно, при транспорте на 1000 км расходуется около 4,5% газа, 0,37% нефти и 1,25% угля. Поскольку сибирский газ транспортируется почти на 4 тыс. км, его расход на собственный транспорт составляет 18%, и на такую величину следует снижать эксергетический КПД всех газопотребляющих установок, если учитывать $\varepsilon_{внеш}$ в η_2.

Получив материалы, их надо обработать, а потом собрать детали и отвезти все на место. Эти затраты сравнительно невелики, они составляют не более 20% от суммы всех затрат. Например, энергетическая «стоимость» легкового автомобиля 81 ГДж, из них 65 ГДж — затраты на материалы.

Критерий СУЗЭКС

Подсчитав таким образом $\varepsilon_{стр}$ (конечно, это расчет громоздкий — деталей и материалов много), мы подготовились к оценке полной энергетической эффективности нашего объекта за весь срок его службы, для чего надо вычислить новый критерий, объединяющий уже описанные. Напишем эксергетический КПД по суммарной затрате эксергии:

$$\eta_\Sigma = \frac{\varepsilon_{отв}}{\varepsilon_{подв} + \varepsilon_{внеш} + \varepsilon_{стр}} = \frac{1}{\frac{\varepsilon_{подв} + \varepsilon_{внеш}}{\varepsilon_{отв}} + \frac{\varepsilon_{стр}}{\varepsilon_{отв}}} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_2} + \frac{1}{K_\varepsilon}}. \qquad (58)$$

Отсюда видно, что η_Σ объединяет два описанных в предыдущих главах показателя: η_2 и K_ε, которые широко известны, но ранее совместно не рассматривались.

Знаменатель формулы (58) представляет собой сумму удельных затрат эксергии (сокращенно СУЗЭКС):

$$З_\varepsilon = 1/\eta_2 + 1/K_\varepsilon. \qquad (59)$$

Этот объединенный показатель энергетической эффективности аналогичен хорошо известному критерию в технико-экономических расчетах — приведенным затратам, измеряемым в руб./ГДж. Но размерность $З_\varepsilon$ — ГДж/ГДж, поскольку рассматривается энергетическая установка и ее целевой продукцией является преобразованная энергия. Поэтому фактически величина $З_\varepsilon$ безразмерна. Если бы рассматривалось производство какого-либо материального продукта, то размерность $З_\varepsilon$ могла бы быть ГДж/кг.

Смысл $З_\varepsilon$ состоит в том, что при сравнении различных вариантов энергетических объектов, приведенных к со-

Таблица 2. Сопоставление безразмерных показателей эффективности теплоснабжающих устройств

	η_1	η_2	K_ε	η_Σ	$З_\varepsilon$
Отопление нефтью из нефтяных сланцев	0,45—0,70 (0,57)	0,11	0,72	0,095	10,5
Отопление газом, получаемым из угля методом Лурги	0,6—0,85 (0,72)	0,13	0,39	0,097	10,3
Горячее водоснабжение на том же газе	0,3—0,7 (0,5)	0,17	0,50	0,126	7,9
Тепловая электростанция на угле	0,33—0,42	0,36	2,5—6,0	0,32—0,34	2,9—3,1
Электроотопление от ТЭС на угле	0,38	0,065	0,53	0,057	17,5
Тепловой насос от ТЭС на угле ($\varphi = 2 \div 4{,}5$)	0,75—1,7	0,23	0,31—0,62	0,13—0,17	6—7,5

поставимому виду в соответствии с обычными требованиями, тот вариант, для которого $З_\varepsilon$ меньше, будет требовать меньше первичной энергии. Причем он будет действительно энергетически наилучшим, так как здесь учитываются все затраты энергии, связанные с объектом.

Теперь можно дать достаточно четкую количественную меру для оценки последствий низкой плотности потока первичной энергии, т. е. дать ответ на проблему, поставленную П. Л. Капицей и описанную в начале гл. 6.

Если низкая плотность потока энергии (вектора Умова—Пойнтинга) приводит к столь большим размерам установки, что K_ε получается малым, то это может настолько повысить СУЗЭКС, что даже при отсутствии первого члена $(1/\eta_2)$ $З_\varepsilon$ получится больше, чем для обычной тепловой электростанции. Это значит, что рассматриваемая установка не экономит первичного топлива, хотя и его не использует в своей работе — затраты топлива на создание объекта перекрывают всю возможную экономию.

Поэтому величину K_ε стараются с особой тщательностью рассчитывать как раз для возобновляемых источников энергии, характеризуемых низкой плотностью потока δ.

В табл. 2 приведены возможные величины η_2 и $З_\varepsilon$. В целом она относится к теплоснабжению, но даны также

цифры и для тепловой электростанции на угле, поскольку от нее снабжаются электроэнергией тепловой насос и электрокотельная. Показатель СУЗЭКС самый большой для электрокотельной и наименьший у теплового насоса. Следует отметить, что эти величины не учитывают режима потребления электроэнергии. Если в термодинамическую систему включить базовые, полупиковые и пиковые электростанции с системными требованиями к ним, то $З_\varepsilon$ может измениться и для электрокотельной, и для теплового насоса. Частично это иллюстрируется в рассмотренном ниже примере с аккумулированием электроэнергии.

Помимо сравнения дискретных величин $З_\varepsilon$ для разных объектов, можно сравнивать непрерывно изменяющиеся $З_\varepsilon$ как функцию непрерывно изменяющегося параметра энергетической установки и находить оптимальные параметры, при которых достигается минимум. В самом общем виде можно показать существование $З_\varepsilon^{\min}$, если предположить, что известна дифференцируемая функция, связывающая K_ε и η_2.

Из $\partial З_\varepsilon/\partial\eta_2 = 0$ получаем

$$З_\varepsilon^{\min} = \frac{1}{K_\varepsilon}\left(1 + \sqrt{-\frac{dK_\varepsilon}{d\eta_2}}\right); \quad \eta_2^{\text{opt}} = \frac{K_\varepsilon}{\sqrt{-dK_\varepsilon/d\eta_2}}. \tag{60}$$

Очевидно, что для существования $З_\varepsilon^{\min}$ требуется

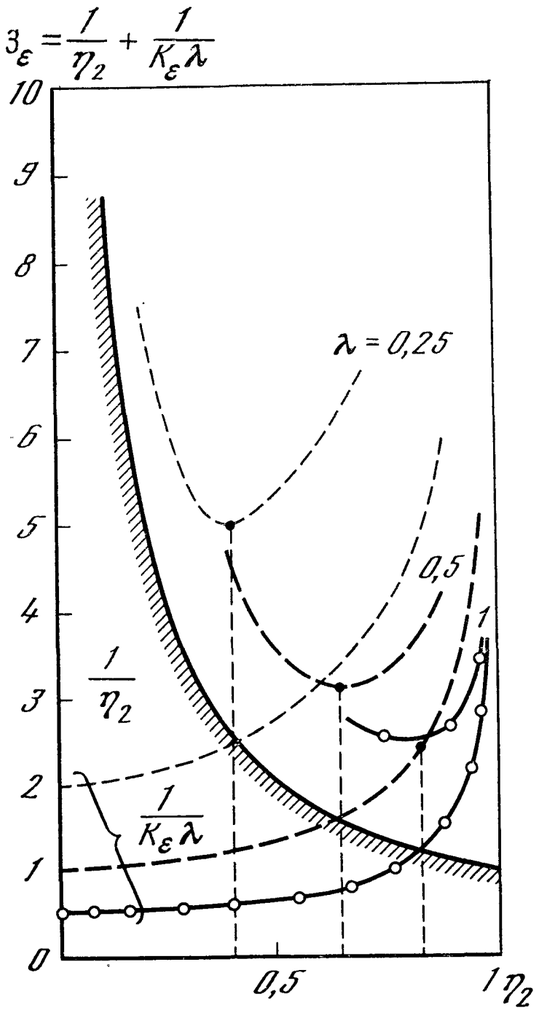
$$dK_\varepsilon/d\eta_2 < 0. \tag{61}$$

Из общих соображений следует, что выражение (61) всегда выполняется на практике, поскольку с ростом термодинамического совершенства, т. е. η_2 установки, обычно ее размеры растут и энергозатраты на создание оборудования увеличиваются, а значит, падает K_ε.

Величина $З_\varepsilon^{\min}$ характеризует абсолютный минимум энергозатрат на любой объект. Подчеркнем, что $\eta_2^{\text{opt}} < 1$.

В этом состоит отличие выводов оптимизации $З_\varepsilon$ от обычного термодинамического расчета, не учитывающего время существования объекта и затраты энергии на его создание. Оказывается, для получения минимального расхода первичной энергии эксергетический КПД должен быть обязательно меньше 1. Повышение η_2 сверх η_2^{opt} приведет к перерасходу энергии.

Для проведения конкретных расчетов нужно знать зависимость K_ε (η_2) в явном виде. На практике она может



Р и с. 25. Зависимость суммы затрат эксергии $З_\varepsilon$ от эксергетического КПД η_2

быть негладкой или вообще недифференцируемой функцией, и тогда ее следует представить в приближенном и сглаженном виде.

Так, например, почти любую монотонно уменьшающуюся функцию можно представить в виде

$$K_\varepsilon = A\eta_2^{-m}, \qquad (62)$$

где A и m — свободные численные параметры ($0 < A < m$).

Подставим (62) в (59) и, отыскивая решение уравнения $\partial З_\varepsilon / \partial \eta_2 = 0$, получаем

$$З_\varepsilon^{\min} = \left(\frac{m}{A}\right)^{\frac{1}{m+1}} + \frac{1}{A}\left(\frac{A}{m}\right)^{\frac{m}{m+1}}, \qquad (63)$$

$$\eta_2^{\text{opt}} = \left(\frac{A}{m}\right)^{\frac{1}{m+1}}.$$

Если в конкретном примере окажется, что $A = 0{,}5$ и $m = 2$, то $\eta_2^{\text{opt}} = 0{,}63$, $З_\varepsilon^{\min} = 2{,}37$, $\eta_2^{\max} = 0{,}42$. На практике зависимость $K_\varepsilon(\eta_2)$ требуется редко, поскольку и K_ε и η_2 зависят от одних и тех же параметров объекта (температуры, плотности тока и т. п.), поэтому производные при оптимизации берутся по этим общим параметрам.

Теперь становится ясным, что снижение потерь эксергии за счет уменьшения разности температур в теплообменнике, плотности тока в проводнике или скорости жидкости в трубопроводе сопровождается ростом затрат эксергии на создание теплообменника, проводника и трубопровода и что оптимальное решение, как правило, всегда существует.

На рис. 25 показана зависимость $З_\varepsilon(\eta_2)$ при различном параметре λ (отношение нормативного срока, за который вычисляется $\varepsilon_{\text{отв}}$, к сроку службы). На графике показаны обе составляющие $З_\varepsilon$.

Энергетическая окупаемость бестопливной энергетики

Есть одна область энергетики, где расчет энергии-нетто особенно необходим. Это возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечные, ветровые, океанские и другие установки, где первичным источником энергии служит не ископаемое органическое или ядерное топливо, а природный поток энергии, который существовал и будет существовать всегда, независимо от деятельности человека. Эту область энергетики иногда называют бестопливной энергетикой.

Характерным примером бестопливной энергетики, или ВИЭ, является гидроэнергетика. Известно, как много мощных гидроэлектростанций построено во всем мире, в том числе весьма крупные — в СССР. В мировом энергобалансе ГЭС играют заметную роль — 5—7%, и по прогнозам она сохранится и в будущем. Гидроэнергетику относят к традиционным ВИЭ, а остальные, еще слабо развитые,— к нетрадиционным. Но все ВИЭ, вся бестопливная энергетика, если она включается в энергетический комплекс страны, должны удовлетворять очевидному требованию: вытесняя современную «топливную» энергетику, давать экономию топлива бóльшую, чем затраты топлива на создание ВИЭ.

Естественно, что небольшие энергетические установки в отдаленных районах страны, а тем более в космосе, этому требованию удовлетворять не должны. Мы вполне можем сжигать много топлива на получение чистых кристаллов кремния, который обеспечит энергией космический корабль с помощью фотопреобразования энергии Солнца. Но для любой установки, входящей в энергосистему и работающей в народном хозяйстве, требование экономии топлива или, точнее, первичной энергии обязательно, иначе создание такой установки бессмысленно.

Очевидно, бессмысленна электростанция, на создание которой расходуется больше электроэнергии, чем она выдаст за весь срок службы. Именно это обстоятельство

имел в виду П. Л. Капица, когда указывал на трудности использования ВИЭ из-за низкой плотности притока энергии солнца и ветра.

Содержание настоящей главы позволяет дать ответ на поставленные вопросы, ибо методика расчетов энергии-нетто как раз и состоит в сопоставлении получаемой энергии с затратами на создание объекта. Методически вопрос упрощается для бестопливной энергетики, поскольку тут первое слагаемое в сумме затрат эксергии $1/\eta_2$ во многих случаях расчета просто исчезает. Для нас оказывается безразличным, с каким КПД приходит поток природной эксергии. Для практики важно лишь, сколько ее надо затратить на создание объекта. Зачастую КПД влияет на эти затраты, но учитывается только через них. Таким образом, для ВИЭ, как правило, единственным показателем является K_ε — коэффициент эксергии-нетто. Его вычисление уже было подробно описано. Здесь же приведем очень простую формулу для оценки любого объекта бестопливной энергетики через срок энергетической окупаемости $t_{ок}$.

Если мы вытесняем тепловую электростанцию мощностью N_e, заменяя ее новым источником, то получим экономию топлива, которое сжигали бы на этой станции, $\frac{N_e}{\eta} t_{ок}$. За время $t_{ок}$ новый источник должен дать столько энергии, сколько было затрачено на его создание. Она приближенно равна массе всего металла М, умноженной на энергоемкость Э этого металла (см. рис. 21). Если металлы и материалы разные, то соответственно надо брать сумму произведений масс на энергоемкость. Ограничимся для простоты случаем, когда вся установка выполнена из одного металла, например стали, и приравняем величины экономии и затрат топлива (т. е. вводим условие $K_\varepsilon = 1$):

$$\frac{N_e}{\eta} t_{ок} = МЭ,$$

отсюда

$$t_{ок} = \eta \frac{М}{N_e} Э = \eta m Э. \qquad (64)$$

Здесь введен важнейший показатель $m = М/N_e$ — удельный расход металла на 1 кВт электрической мощности ВИЭ.

Время $t_{ок}$ получается в секундах, если все другие величины в системе СИ: $[m]$ = кг/Вт, [Э] = Дж/кг. Если

определить $t_{ок}$ как число лет работы для получения окупаемости при ограниченном числе часов работы в году h, тогда

$$t_{ок} = \frac{\eta m Э}{3600h}. \qquad (65)$$

В качестве примера рассмотрим расчет $t_{ок}$ для двух схем океанских тепловых электростанций, проектные данные которых приведены в гл. 3. Там удельный расход металла уменьшился от 2150 кг/кВт в одной схеме до 250 кг/кВт — в другой. Поскольку преобладающий металл остался неизвестным, но можно предполагать, что доля нержавеющих сталей и титана велика, примем ориентировочную энергоемкость Э = 200 МДж/кг, что выше, чем для нержавеющих сталей, но ниже, чем для титана. Кроме того, полагаем, что установка работает в условиях сезонного изменения температуры воды в верхнем слое, так что h = 4000 ч/год (в тропиках вполне может быть h = 8000 ч/год). Тогда

$$t_{ок} = \frac{0{,}4 \cdot 2{,}15 \cdot 2 \cdot 10^8}{3600 \cdot 4 \cdot 10^3} = 12 \text{ лет}.$$

Такой срок энергетической окупаемости, по-видимому, фирмы сочли неприемлемым. Хотя он и меньше расчетного срока службы, но, конечно, велик.

Если же обратиться к другой схеме, где m = 250 кг/кВт, то

$$t_{ок} = \frac{0{,}4 \cdot 0{,}25 \cdot 2 \cdot 10^8}{3600 \cdot 4 \cdot 10^3} = 1{,}4 \text{ года},$$

что вполне приемлемо.

Подобные расчеты имеют характер предварительных оценок по порядку величин, так что здесь не имеют значения затраты энергии на обработку, сварку и т. п. Эти затраты энергии относительно малы, и их можно учитывать, соответственно несколько повысив энергоемкость материалов.

Полезность этих расчетов можно назвать «запретительной». Если они показывают чрезмерный срок энергетической окупаемости какого-либо из новых энергетических проектов, то его уже не смогут спасти никакие дополнительные уточнения. Если же по приведенным оценкам срок энергетической окупаемости оказался достаточно мал, то схема заслуживает дальнейшей, более глубокой проработки.

Таким образом, приведенные оценки позволяют про-

изводить предварительную «отбраковку» проектов и оставлять для более подробных экономических расчетов только энергетически приемлемые.

Проводник с током

Теперь приведем несколько примеров оптимизационных расчетов на минимум СУЗЭКС. Все они основаны на упрощенных постановках оптимизационных задач с варьированием только одного параметра и имеют чисто иллюстративный характер. Реальные сложные задачи требуют большого объема расчетов на ЭВМ. На таких задачах трудно показать существо методики.

Цель этих примеров — показать общность развиваемого подхода, применимость как к электротехническим, так и к теплотехническим объектам, непротиворечивость результатов уже известным и апробированным на практике решениям. В то же время предлагаемый критерий СУЗЭКС позволяет выявить и возможность снижения расхода первичной энергии по сравнению с существующей практикой, т. е. выявить действительные возможности энергосбережения.

Простейшим объектом является проводник с постоянным током. Здесь эксергия — это передаваемая электроэнергия, а потери эксергии — джоулево тепло в проводнике. Строго говоря, следует учитывать в балансе эксергии температуру охлаждающего проводник теплоносителя и эксергию отводимого тепла, но в приближенной постановке ею можно пренебречь.

В этом случае

$$\eta_2 = \frac{IU}{IU + I^2R}, \tag{66}$$

$$R = \frac{L}{\sigma F}, \tag{67}$$

где I, U — ток и напряжение, L — длина проводника, F — сечение, σ — электропроводность материала и З — его массовая энергоемкость, т. е. затраты энергии на получение единицы массы проводника.

Согласно (59)

$$З_\varepsilon = \frac{1}{\eta_2} + \frac{1}{K_\varepsilon} = 1 + \frac{IL}{\sigma UF} + \frac{Э\rho L}{IU\tau}F; \tag{68}$$

$$\frac{\partial З_\varepsilon}{\partial F} = -\frac{I}{\sigma F^2} + \frac{Э\rho}{I\tau} = 0; \quad j_{opt} = \frac{I}{F_{opt}} = \sqrt{\frac{\sigma Э\rho}{\tau}}. \tag{69}$$

Оказалось, что оптимальная плотность тока зависит только от срока службы и свойств материала проводника. Если принять $\tau = 3$ года, то для меди $j_{opt} = 0{,}77$ А/мм², а при росте τ величина j_{opt} еще снижается. На практике плотность тока обычно выше (1—2 А/мм²). Оценка показывает, что при принятой величине Э = 120 МДж/кг снижение плотности тока против обычно применяемой дает экономию энергии.

Та же величина j_{opt} получается при отыскании минимума суммы D джоулевых потерь за весь срок службы и затрат энергии на изготовление проводника:

$$D = I^2\frac{L}{\sigma F}\tau + Э\rho LF. \tag{70}$$

Здесь, как и в (68), рост площади сечения F уменьшает первый член и увеличивает второй. Из $\partial D/\partial F = 0$ получаем (69). Оптимальные условия достигаются при равенстве обоих слагаемых (70).

Эту же задачу оптимизации проводника можно решать и в видоизмененной постановке, если учитывать зависимость электропроводности σ от температуры T проводника. Для всех металлов с уменьшением температуры σ растет, но определить, уменьшаются потери эксергии или нет, можно, вычислив сумму

$$D = I^2\frac{L\tau}{\sigma(T)F}\frac{T_0 - T}{\eta T} + Э\rho FL,$$

где η — эксергетический КПД холодильной машины и рост $\sigma(T)$ может быть компенсирован ростом температурной функции $(T_0 - T)/T$ при снижении температуры. Очевидно, что отыскание минимума потерь D требует решения задачи на так называемый связанный экстремум, поскольку здесь уже две независимые переменные: F и T.

Совершенно необычна постановка задачи по оптимизации проводника с током в случае, когда рассматривается сверхпроводник, при этом $\sigma = \infty$.

Вплоть до последнего времени были известны только металлические сверхпроводники, у которых сверхпроводимость существовала при температурах ниже 23 К (лучший сплав — ванадий с галлием). Поддержание столь низких температур требует огромных затрат эксергии на получение жидкого гелия, способного обеспечивать охлаждение металлов до 5 К. Каждый ватт потерь при температуре жидкого гелия требует затрат эксергии на поддержание температуры не менее чем $(T_0 - T)$: $T =$

$= (300 - 5): 5 = 60$ Вт. На самом деле, с учетом низких КПД процессов ожижения, требуется почти на порядок больше. Эти затраты энергии снижали выигрыш от исчезновения электрического сопротивления, так что практического воплощения сверхпроводящие кабели не получили.

Однако в конце 1986 г. Беднорц и Мюллер открыли возможность повышения температуры сверхпроводящего состояния до 36 К в керамических соединениях редкоземельных элементов, бария, меди и кислорода. К началу 1987 г. в результате возникшего бума работ по повышению температуры сверхпроводимости установлено, что в соединениях на основе лантана или иттрия (La_2BaCuO_4; Y_2BaCuO_4) можно получить сверхпроводимость при температуре 90—100 К. При этом в лучших образцах сверхпроводимость удается сохранить при плотности тока в сотни ампер на 1 мм^2 и в магнитных полях до десятков тесла. Не обнаружено изменения свойств образцов керамики как в состоянии сверхпроводимости с протеканием тока, так и хранимых без тока. Считается, что керамика ведет себя как нормальные металлические сверхпроводники, ток в которых не изменяется в течение многих лет. Такие опыты проводились на образцах в виде кольца с током, причем отсутствие его изменений регистрировалось весьма точно — по магнитному полю.

Важнейшей практической особенностью новых сверхпроводников является достаточность жидкого азота (77 К) для их охлаждения. Стоимость жидкого азота несравненно ниже, чем жидкого гелия: всего лишь вдвое превышает стоимость затраченной на его получение электроэнергии и соизмерима с ценой газированной воды. Очевидно, что затраты эксергии на поддержание температуры 80 К $T_0 - T/T = 300-80/80 = 2{,}75$, примерно в 20—30 раз меньше, чем гелиевых температур. Поэтому в настоящее время сложились объективные условия для активного внедрения новых сверхпроводников в энергетику.

Задачи эксергетической оптимизации сверхпроводящих линий электропередач еще не поставлены. Но их постановка радикально отличается от приведенных выше в силу полного отсутствия электрического сопротивления, т. е. первого члена в сумме потерь D. Это однако, не значит, что оптимизировать нечего. Видимо, следует искать минимум суммы затрат эксергии на создание проводника и системы его теплоизоляции от окружающей среды и затрат на прокачку жидкого азота и его ожижение с учетом

неидеальности теплоизоляции и слабого притока тепла в жидкий азот.

Наличие сильного неоднородного электрического поля вокруг кабеля, а также градиента температуры, следовательно, и диэлектрической проницаемости в жидком азоте будет вызывать самопроизвольное течение жидкости, которое можно полезно использовать. В полной постановке задача оптимизации сверхпроводящего кабеля с охлаждением жидким азотом фактически чисто гидродинамическая, хотя критериями при оптимизации могут быть те же суммарные затраты эксергии.

Униполярный электродвигатель

Расчеты энергии-нетто позволяют проводить термодинамический анализ электрических машин, определять их оптимальные размеры и КПД. Покажем это на простейшем примере линейного униполярного двигателя.

Положим, что все затраты энергии на его изготовление определяются размерами медного бруса прямоугольного сечения, служащего ротором двигателя. Поскольку размеры статора с обмоткой возбуждения пропорциональны размерам ротора, влияние статора можно учесть введением соответствующего множителя, что в настоящем примере не сделано.

Исходное уравнение — закон Ома для ротора —

$$j = \sigma (E - VB). \tag{71}$$

Здесь $j = I/lh$ — плотность тока, V — скорость, B — магнитная индукция, l и h — размеры ротора.

Подведенная электрическая мощность

$$IU = jEFl, \tag{72}$$

где $F = bh$ — сечение ротора.

Отведенная механическая мощность

$$P = VjBFl. \tag{73}$$

Затраты энергии на изготовление ротора

$$\varepsilon_{стр} = Э\rho Fl. \tag{74}$$

Согласно общей формуле (58)

$$\eta_\Sigma = \frac{\tau P}{\tau IU + Э\rho Fl} = \frac{1}{E/VB + Э\rho/VjB\tau} = \frac{1}{1/\eta + \gamma^2/\eta(1-\eta)}. \tag{75}$$

Здесь $\eta = VB/E$ — электрический КПД (отношение противоЭДС к наложенному электрическому полю), $\gamma^2 = \Theta\rho/\tau E^2\sigma$ — безразмерный параметр.

Этот пример интересен тем, что второй член знаменателя (75), представляющий собой $1/K_\varepsilon$, позволяет в простой и наглядной форме показать фактическое уменьшение K_ε с ростом η (при $\eta > 0{,}5$), что требуется для осуществления оптимума согласно условию (61).

Из $\partial\eta_\Sigma/\partial\eta = 0$ получаем оптимальный КПД электродвигателя

$$\eta_{opt} \cong 1 - \gamma + \gamma^2. \qquad (76)$$

Величина γ обычно очень мала и η_{opt} близок к 1.

Аккумуляторы для использования провальной энергии в энергосистемах

Как известно, в энергосистемах европейской части СССР во время так называемого ночного провала нагрузка составляет 50—60% дневного максимума. В качестве одного из мероприятий по выравниванию графика нагрузки обычно рекомендуется создание аккумулирующих ночную энергию установок, выдающих энергию в часы пик. Такими установками могут быть маховики, индуктивные и другие накопители, но наиболее разработанными и применяемыми являются гидроаккумулирующие станции (ГАЭС).

Для иллюстративного расчета эффективности аккумуляторов идеализируем сложный реальный график дневной нагрузки с двумя максимумами и ночным провалом, разбив его условно на три части: α — провальную, β — среднюю и γ — пиковую. В пределах каждой части нагрузку будем считать постоянной.

Величины α, β и γ ($\alpha + \beta + \gamma = 1$) показывают, какую долю суток или всего срока эксплуатации система работает в соответствующем режиме. Каждой части графика соответствует своя заданная величина КПД η_2 и коэффициента энергии-нетто K_ε. Они принимаются: $\eta_\alpha = 0{,}38$; $K_{\varepsilon\alpha} = \infty$ (здесь принято $1/K_{\varepsilon\alpha} = 0$, так как производится разгрузка уже существующего базового оборудования, поэтому затраты на создание оборудования отсутствуют); $\eta_\beta = 0{,}35$; $K_{\varepsilon\beta} = 5$; $\eta_\gamma = 0{,}25$; $K_{\varepsilon\gamma} = 10$.

В пиковом режиме обычно используется оборудование меньшей единичной мощности и с более низким КПД,

чем в базовой части. Критерий СУЗЭКС для этих режимов

$$З_\alpha = 1/\eta_\alpha + 1/K_{\varepsilon\alpha} = 1/0{,}38 = 2{,}64;$$
$$З_\beta = 1/0{,}35 + 1/5 = 3{,}05;$$
$$З_\gamma = 1/0{,}25 + 1/10 = 4{,}1.$$

Поскольку $З_\alpha < З_\gamma$, очевидна целесообразность аккумулирования энергии и выдачи ее в часы пик. Но всякий аккумулятор имеет свой КПД: $\eta_{ак} < 1$, так как он отдает меньше энергии, чем получает в провальные часы. Кроме того, аккумулятор следует изготовить, т. е. затратить энергию, что характеризуется соответствующим коэффициентом энергии-нетто $K_\varepsilon^{ак}$, к сожалению еще очень мало исследованным в литературе.

Для иллюстрации примем $\eta_{ак} = 0{,}75$ и $K_\varepsilon = 10$, что приблизительно соответствует ГАЭС, причем K_ε взято по данным для ГЭС. С учетом аккумулятора СУЗЭКС имеет вид

$$З_\alpha^{ак} = 1/\eta_\alpha\eta_{ак} + 1/K_\varepsilon^{ак} = 1/(0{,}38\cdot 0{,}75) + 1/10 = 3{,}6.$$

Оказалось, что $З_{ак} < З_\gamma$, следовательно, аккумулирование действительно дает экономию затрат первичной энергии, которая в данном случае составит

$$\frac{З_\gamma - З_\alpha^{ак}}{З_\gamma} = \frac{4{,}1 - 3{,}6}{4{,}1} = 12\%.$$

Следует подчеркнуть, что более правильно в качестве η_α взять величину дифференциального КПД, т. е.

$$\eta'_\alpha = \partial N/\partial B \simeq 0{,}45,$$

где N — мощность в провальном режиме, B — расход топлива (в энергетических единицах). Поскольку $\eta'_\alpha > \eta_\alpha$, величина экономии энергии за счет применения аккумулятора будет заметно больше.

Котел-утилизатор

В предыдущем примере в формуле (59) для провальной энергии исчезал второй член ($1/K_\varepsilon$). В настоящем примере, относящемся к актуальной проблеме использования вторичных энергоресурсов, исчезает первый член ($1/\eta_2$).

Поскольку речь идет об использовании потока эксергии, сбрасываемого в окружающую среду, текущий подвод эксергии можно считать даровым по сравнению с полу-

чением теплоты в обычных источниках с расходом топлива. Положим, что рассматриваемый котел-утилизатор дает пар высоких параметров (600 К), используя уходящие газы трубчатой печи нефтеперерабатывающего завода. Удельный тепловой поток через трубки котла оценивается в 20 кВт/м², а удельный поток эксергии требует умножения на $(1 - T_0/T) = 1 - 300/600 = 0{,}5$, т. е. составляет 10 кВт/м² (расчет проводим в удельных показателях — на 1 м² поверхности трубок котла).

При толщине трубок 5 мм масса 1 м² составляет 40 кг. Принимая согласно рис. 18 удельную энергоемкость стальных трубок котла 70 МДж/кг, получаем затраты $\varepsilon_{стр} = 70 \cdot 40 = 2{,}8$ ГДж. Если принять полный срок эксплуатации котла 10 лет (75 тыс. часов), то полученная от него в паре эксергия за этот срок составит $10^4 \cdot 75 \cdot 10^3 \cdot 3600 = 2700$ ГДж. Следовательно, здесь $K_\varepsilon \approx 10^3$, $З_\varepsilon \simeq 10^{-3}$. С учетом необходимости резервного котла с подачей топлива только для пусковых и аварийных режимов эти показатели могут изменяться в 2—3 раза и фактически не повлияют на результат сравнения. Частая смена котлов-утилизаторов из-за коррозии, которую можно оценить, например, снизив срок службы до 1 года, вызовет увеличение $З_\varepsilon$ на порядок, т. е. до 10^{-2}.

Этот простой пример, показывающий чрезвычайно высокую величину K_ε, поясняет причину нынешнего значительного интереса к использованию вторичных источников энергии. Коэффициент эксергии-нетто K_ε позволяет их ранжировать и рекомендовать в первую очередь использовать те, у которых K_ε выше.

Но здесь следует различать две принципиально различные ситуации.

1. Имеется ряд разных сбросов эксергии и один из способов утилизации. Ставится вопрос, какой из них использовать в первую очередь. Здесь достаточно искать максимум K_ε.

2. Имеется один сброс эксергии и несколько вариантов его использования, требуется выбрать лучший вариант. Здесь нужно искать минимум $З_\varepsilon = 1/\eta_2 + 1/K_\varepsilon$.

Примером первого случая служат разные сбросные потоки тепла на нефтеперерабатывающем заводе, имеющие разную величину и разную температуру. Естественно, что K_ε будет выше для утилизации высокотемпературного потока газа после трубчатой печи, чем потока воздуха после охлаждения продукта перегонки, потому что из-за низкой температуры эксергия воздуха очень мала.

Примером второго случая служит выбор различных вариантов утилизации теплоты газов после трубчатой печи. Здесь можно рассматривать рекуператор тепла, котел-утилизатор для получения технологического пара, паротурбинную установку на водяном паре и фреонах, воздушную турбину с подогревом воздуха уходящими газами из печи и т. п.

Дополнительно следует учесть, что легче использовать те сбросы, у которых плотность потока эксергии выше. Для ориентировки полезно определять модуль вектора Умова—Пойнтинга.

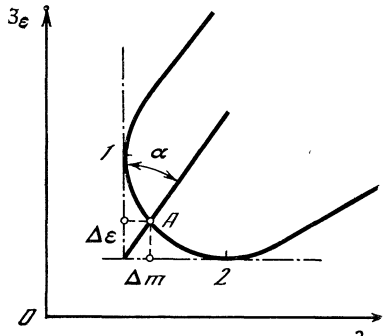
Построение *C*-кривой

Выше было показано как в общем виде (60) и (63), так и на нескольких упрощенных примерах, что существует абсолютный минимум суммы затрат энергии для любого энергетического объекта. Для отыскания такого минимума в сложных случаях, соответствующих реальным практическим задачам, естественно составлять более сложные модели и применять ЭВМ. До сих пор наши расчеты с экономическими расчетами по денежным эквивалентам затрат никакой связи не имели. Возникает вопрос: какова связь между оптимальными параметрами, найденными согласно предлагаемой методике по минимизации СУЗЭКСа $З_\varepsilon$, и аналогичными параметрами, найденными из минимума приведенных денежных затрат $З_m$, когда денежные затраты отнесены к той же единице эксергии, отпущенной потребителю.

Покажем связь в графической форме, построив график возможной зависимости $З_\varepsilon$ $(З_m)$.

При изменении какого-либо варьируемого параметра (например, температурного напора в теплообменнике) будет происходить соответствующее изменение обеих функций этого параметра: $З_\varepsilon$ и $З_m$, как правило, непрерывным образом. Имея графики каждой из зависимостей, всегда можно исключить параметр и построить график зависимости $З_\varepsilon$ $(З_m)$, форма которого напоминает букву *C* и поэтому называется *C*-кривой. Каждая из величин $З_\varepsilon$ и $З_m$, отложенная на осях координат графика рис. 26, должна иметь минимум (эти точки обозначены *1* и *2*). Их соединяет отрезок кривой, который можно назвать дугой выбора.

Очевидно, что если принимать решение о выборе оптимизируемого параметра, соответствующее точкам выше *1* или правее *2*, то они дадут перерасход и первичной энер-



Р и с. 26. Сопоставление затрат эксергии и денежных затрат на *C*-кривой

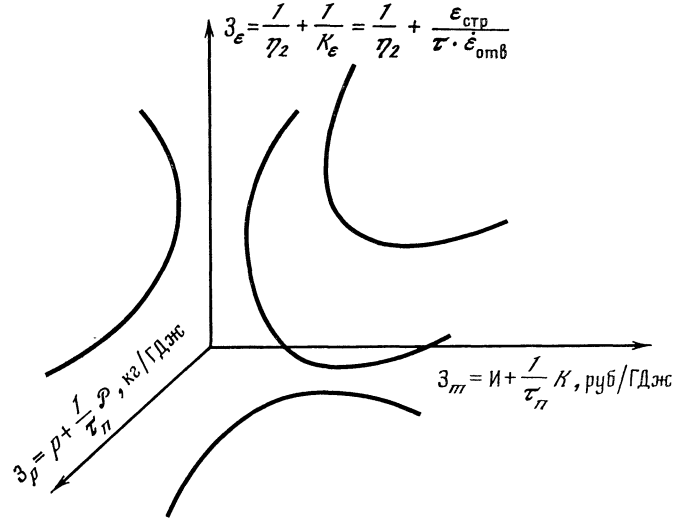
гии, и топлива, поэтому их можно сразу исключить из рассмотрения. В точке *1* достигается минимум приведенных денежных затрат, но при этом получается наибольший перерасход энергии. В точке *2* достигается минимум затрат энергии, но ценой перерасхода денежных затрат. Каждая из точек между *1* и *2* на дуге выбора, обозначенных A, соответствует компромиссному решению. Оно принимается (когда существуют оба уменьшенных перерасхода: Δm и $\Delta\varepsilon$) из дополнительных соображений (одно из них указано далее).

Вероятно, по мере уточнения этих моделей оптимальные параметры по обоим методам будут сближаться, что можно выразить, обозначив длину «дуги выбора» l в виде $l \to 0$. Если получится $l < \Delta$ (Δ — погрешность расчета удельных затрат), оптимальные параметры по термодинамике и экономике станут неразличимы.

Во многих практических случаях точка A, отражающая существующее состояние объекта (или запроектированное без оптимизации), находится вне дуги выбора, т. е. правее *2* или выше *1*. При изменении оптимизируемого параметра она перемещается и может попасть на дугу выбора. Такое перемещение соответствует снижению затрат и энергии, и денежных, поэтому оно обеспечивает абсолютную эффективность изменения оптимизируемого параметра.

Если варьировать еще один параметр задачи (например, стоимость топлива, изменяющуюся в широких пределах), то *C*-кривые деформируются, они способны выродиться в отрезок прямой, четко обозначающей единственное значение оптимума как по денежным затратам, так и по энергии. При достаточно широкой вариации второго параметра начальная точка A, которая была на правой ветви кривой, может перейти на левую, и наоборот.

В порядке дальнейшего обобщения графического представления результатов оптимизации можно предложить по третьей оси декартовых координат откладывать сум-



Р и с. 27. Трехмерная *C*-кривая в системе координат эксергия—экономика—вредные выбросы

марное загрязнение окружающей среды — сумму вредных выбросов как за весь срок эксплуатации, так и совершенных при создании объекта, отнесенных к той же единице отпущенной потребителю эксергии. Если вредных выбросов несколько, они приводятся к одному, эквивалентному, с помощью различных коэффициентов. Геометрическое место точек, образующих поверхность выбора, аналогичную дуге выбора, в общем виде заранее определить трудно. Его построение позволит облегчить принятие решения в трехмерной системе координат эксергия—экономика—вредные выбросы.

Характер пространственной *C*-кривой в этой трехмерной системе координат показан на рис. 27. Структура всех трех величин, отложенных на осях, однотипна: текущие компоненты плюс единовременные, отнесенные к некоторому отрезку времени. Для удельных выбросов $З_p$, как и для СУЗЭКСа, это τ — весь срок эксплуатации объекта.

Поскольку $З_\varepsilon$, $З_m$ и $З_p$ — это удельные показатели, они отнесены к единице продукции. Для энергетических предприятий, поставляющих электроэнергию и теплоту, величина $З_\varepsilon$ безразмерна (ГДж/ГДж), тогда как размерность $З_m$ — руб./ГДж, $З_p$ — кг/ГДж. Для химического

или металлургического предприятия в знаменателе размерности — килограмм выпускаемой продукции.

Проекции пространственной C-кривой на координатные плоскости дают плоские C-кривые для принятия компромиссных решений по каждой паре координат.

Положение точки A на дуге выбора рис. 26, соответствующее принимаемому решению, еще не может быть найдено путем каких-либо строгих аналитических операций. Существующая нормативная документация и вся практика обычных технико-экономических расчетов требуют, чтобы проектное решение обеспечивало минимум приведенных денежных затрат, т. е. чтобы точка A совпадала с *1*. По-видимому, такая однобокость критерия оптимизации нерациональна и в обозримом будущем будет принят обобщенный критерий, учитывающий и необходимость более активного энергосбережения. Очевидно, что при планировании всего энергетического комплекса на минимум денежных затрат допускается значительный перерасход энергии, пропорциональный $\Delta\varepsilon$ (см. рис. 26).

Предположим, что при распределении капиталовложений экономия денежных средств пропорциональна экономии энергии, и свяжем Δm и $\Delta\varepsilon$ равенством $\Delta m = K\Delta\varepsilon$. Величина коэффициента пропорциональности K названа коэффициентом политической эквивалентности. Размерность K такая же, как у цены на топливо: денежная единица, отнесенная к единице энергии. Поэтому (в качестве примера) предложено принимать K равным мировым ценам на топливо, используемое на данном объекте [22]. Можно принимать K равным денежным затратам на прирост производства единицы энергии (тонны условного топлива).

Для иллюстрации различия в проектных решениях в [22] проведена полная оптимизация теплообменника на минимум денежных затрат (см. рис. 26, точка *1*), на минимум энергетических затрат (точка *2*) и, что особенно важно, показано компромиссное решение при коэффициенте политической эквивалентности $K = 600$ фр./т у.т. Разница оптимальных параметров при денежном и энергетическом критериях оптимизации очень велика (табл. 3): размеры теплообменника различаются в 3 раза, а затраты энергии — в 4 раза. Компромиссное решение при принятой величине K оказалось близким к оптимуму по денежному критерию, но и в этом случае при практически одинаковых денежных затратах получено снижение затрат энергии на заметную величину — 10%. По мере роста K

Таблица 3. Оптимизация водо-водяного теплообменника

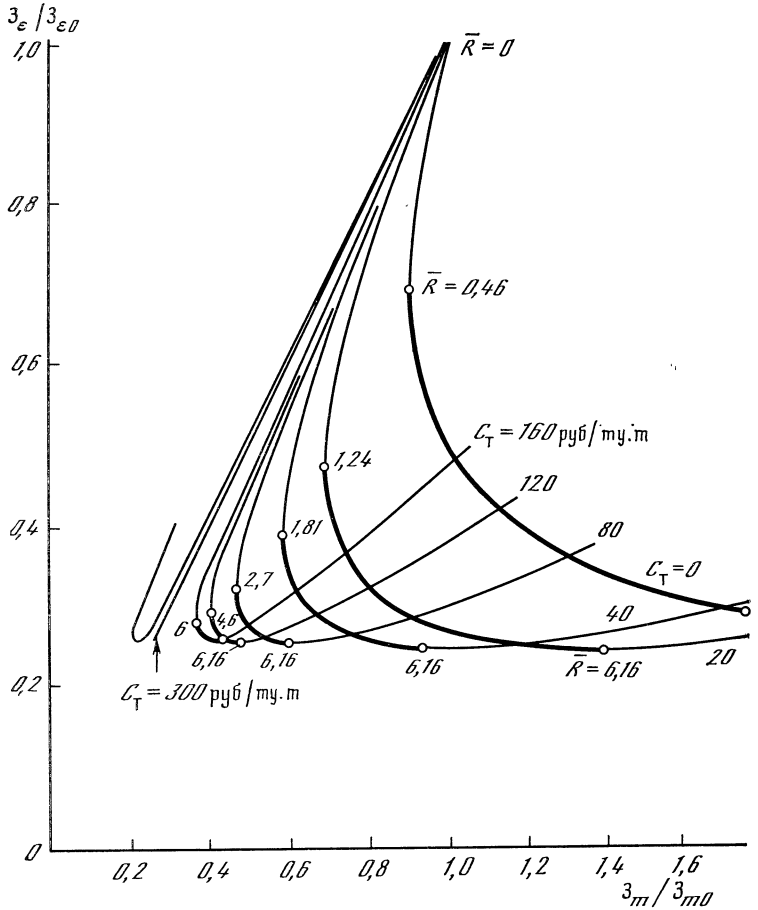
Показатель	Критерии оптимизации		
	денежные затраты	энергозатраты	компромисс $K =$ $= 600$ фр./т у. т.
Площадь поверхности, м²	10,9	35,2	11,4
Скорость воды, м/с	1,86	0,51	1,72
Мощность прокачки, Вт	185,6	14,4	167,2
Энергетические затраты, МДж	125 300	31 200	113 870
Денежные затраты, фр.	27340	72200	27400

оптимальное решение будет сдвигаться в сторону роста размеров и дальнейшего снижения полных энергозатрат.

На C-кривой рис. 26 выбор решения иллюстрируется графически: проведена прямая под углом α к вертикали, проходящая через точку пересечения касательных к C-кривой в точках *1* и *2*. Как видно из графика, при малых K, т. е. малых денежных затратах на 1 т у.т., $\alpha \to 0$ и точка A совпадает с *1*, т. е. с минимумом денежных затрат. Эта ситуация отражает современную нерациональную практику технико-экономических расчетов. По мере удорожания прироста производства энергии точка A будет приближаться к точке *2*, т. е. оптимальным решением станет более активное энергосбережение.

Как видно из данных таблицы, оптимальный по денежному критерию вариант требует втрое меньше денежных затрат, но вчетверо бóльших затрат энергии, чем оптимальный по энергии. Разница очень велика!

В качестве примера плоской C-кривой для конкретного объекта приведем результаты расчета Б. Е. Брусковского и А. И. Гладунцова по эффективности утепления жилых зданий [24]. В данном случае термодинамической системой является жилое помещение, в котором поддерживается постоянная температура путем подвода теплоты через систему отопления, что компенсирует отвод теплоты в окружающую среду через ограждения, т. е. стены здания. Увеличение теплового сопротивления стен снижает потребность в теплоте, экономя тем самым и расход эксергии, и эксплуатационные расходы, но увеличивает затраты эксергии на строительные материалы и одновременно стоимость здания. На графике рис. 28 показана зависимость $З_\varepsilon$ ($З_m$) при росте относительного теплового сопро-



Р и с. 28. Семейство безразмерных *С*-кривых для утепления зданий при различных ценах топлива (от 0 до 300 руб./т у. т.)

тивления $\bar{R}$ (по отношению к существующим нормативам). Как видно из графика, увеличение $\bar{R}$ от 0 до $\sim$1,8 при $C_т = 40$ руб./т у.т. приводит к снижению и $З_\varepsilon$ и $З_т$, после чего $З_т$ проходит минимум и начинает расти, а затем и $З_\varepsilon$ проходит минимум. Поскольку наибольшие вариации можно ожидать в величине принимаемых цен на топливо, построен набор *С*-кривых в широком диапазоне замыкающих затрат на топливо $C_т$. Все они проходят через исходную точку, где $\bar{R} = 0$.

Этот практический пример иллюстрирует упомянутый выше случай, когда существующее положение и экономически, и энергетически неэффективно. Можно сомневаться в выгодности увеличения теплового сопротивления между точками обоих минимумов, но увеличение $\bar{R}$ от 0 до $З_т^{min}$, где снижаются и расход эксергии, и приведенные затраты, несомненно эффективно.

Обострение энергетических проблем всего человечества неумолимо, как второй закон термодинамики. Поэтому можно думать, что постепенно эксергия-нетто войдет во все расчеты эффективности энергетических объектов, дополняя и уточняя расчеты по денежным критериям.

Глава 8. Эксергия против пустыни

Созвучье полное в природе,
Лишь в нашей призрачной свободе
Разлад мы с нею сознаем.

Ф. Тютчев

Наступление пустынь

В этой главе расчет эксергии-нетто будет показан на примере одной из возможностей целенаправленной деятельности человека в борьбе с разрушительным процессом опустынивания. Это борьба за улучшение природных условий и среды обитания в довольно густонаселенных районах пояса Земли — приблизительно от экватора до 45-й параллели северной или южной широты, где значительную часть суши занимают пустыни.

Под пустынями понимаются природные области с осадками менее 250 мм в год, превышением испарения над осадками во много раз, отсутствием поверхностного стока воды, скудной растительностью и невозможностью вести хозяйство без орошения. Пустыни занимают 83% территории Австралии, 59% Африки, 38% огромной территории Азии — в целом пятую часть земной суши. В СССР они занимают 14% общей площади страны. Районы, охватываемые пустынями, непрерывно растут, и этот прирост составляет в год 50 тыс. км^2.

Причиной роста пустынь во многих районах мира является деятельность человека. Например, в Африке потребление растительности на топливо достигает 3 м^3 на человека в год. При этом бытовое расходование топлива составляет 7—14 МДж на человека в год, что в 5—7 раз больше удельного потребления в высокоразвитых странах. Это объясняется низким КПД очагов для приготовления пищи. Вокруг городов в средней Африке древесная растительность уничтожена в радиусе не менее 100 км. Во всех деревнях заготовка дров проводится на расстоянии 5—10 км от поселений. По прогнозам, эти районы не превратятся в пустыню лишь в том случае, если будут приняты эффективные меры по борьбе с опустыниванием.

В 1976 г. пустыня в Судане продвигалась на юг со скоростью 5 км в год. На Эфиопском плато ежегодно начиная с середины XX в. леса сводятся без восстановления на площади около 1000 км^2, и это уже привело к катастрофическим засухам, за которыми следует опустынивание. Всего в Эфиопии считается подверженным опустыниванию 85 млн гектаров, в Судане — 200 млн, в Алжире — 83 млн. Опустынивание — одна из наиболее острых проблем, стоящая перед Мавританией. Согласно докладу ООН, в настоящее время 85% территории страны превратилось в безводную пустыню и Сахара продолжает наступление поистине головокружительными темпами: 6 км в год. Страна оказалась перед реальной перспективой оказаться поглощенной раскаленной пустыней.

В СССР проблемы опустынивания также стоят достаточно остро. Вот что говорил на пленуме Союза писателей СССР Т. Каипбергенов о высыхании Аральского моря — главного хранителя земель от наступления азиатских пустынь Кызылкумов и Каракумов. «За четверть века на глазах одного поколения людей море акваторией свыше 6 млн гектаров и глубиной 69 м... высохло почти наполовину. Амударья и Сырдарья в течение уже нескольких лет никуда не впадают... морские порты Муйнак и Аральск давно окружены на многие километры лишь барханами. За последние годы высохли сотни тысяч гектаров зеленых тугаев, камышовых зарослей... Перспектива самая мрачная — экологическая катастрофа... Словно забыли мы, что самая главная функция огромного водоема среди песков — служить естественным солнцеприемником. В результате высыхания моря обнажаются скопленные за несколько веков соли... ежегодно ветром в Приаралье выносится до 75 млн т соли... За последние годы ветер рассеял на территории Каракалпакии, северных районов Туркмении около 1 млрд т соли... Надвигающаяся катастрофа — это ни в коей мере не поражение перед слепой стихией, а плод преступной халатности и самонадеянности человека. Сегодня спасение Арала, сохранение условий для нормальной жизни — это вопрос престижа социалистических стран, это вопрос нашего будущего» *.

Наряду с другими известными мерами борьбы с песками появилась возможность, для которой требуется только то, что в пустыне есть в избытке: солнце, пространства и соль. На выходе же получается энергия и пресная вода,

* Лит. газ., 1987, 6 мая.

т. е. те именно факторы, недостаток которых не дает возможности остановить наступление песков и заставить их отступить.

Природный поток первичной энергии — солнечной — в пустынях очень велик, облачность мала и интенсивность инсоляции в максимуме доходит до 10^3 Вт/м², а в среднем составляет 200—300 Вт/м². Преобразование ничтожной части лучистой энергии, падающей на пустыни, в электроэнергию с получением пресной воды наверняка позволило бы остановить пески. Здесь особенно уместно вспомнить прогноз Н. А. Умова с его расчетами для Сахары.

Но мы уже могли убедиться на многих примерах, что освоение возобновляемых источников энергии упирается в низкую плотность притока энергии: такая величина, как 200—300 Вт/м² в виде теплового излучения, даже при применении концентраторов еще мала и приводит к сравнительно невысокому значению коэффициента эксергии-нетто. Это обстоятельство пока препятствует широкому применению и гелиостатных (башенных) солнечных электростанций, и фотопреобразователей солнечной энергии на полупроводниках. Из-за низкой плотности потока солнечной энергии затраты энергии на металл для гелиостатов и на полупроводники или концентраторы излучения еще недопустимо велики.

Для получения энергии в пустынях требуются такие способы преобразования энергии, в которых непосредственный приемник излучения создается из уже имеющихся в природе материалов без дополнительных затрат энергии. Кроме того, необходимо обеспечить концентрацию потока энергии на много порядков (повышение модуля вектора Умова—Пойнтинга примерно в сто тысяч раз), чтобы можно было ограничиться нормальными размерами энергетического оборудования.

Одним из таких источников может стать солнечный соляной пруд. Поскольку накопление солнечной энергии в нем происходит при течении больших количеств воды, такое энергетическое направление можно назвать гелиогидротехникой. Это комбинация гелиотехники и гидротехники. От гелиотехники сюда переносится информация об интенсивности солнечного излучения, его изменении во времени, сведения о распространении излучения в воде и об интенсивности его поглощения в зависимости от длины световых волн и прозрачности соленой воды. Из гидротехники заимствуются насосы, технические методы сбора и транспорта нагретого рассола по керамическим

трубам, подобным применяемым в оросительных системах, создание плотин и водоемов с рассолом на больших площадях.

Разумеется, важную роль играет здесь и теплоэнергетика, поскольку преобразование энергии нагретого солнцем рассола в электроэнергию и одновременное получение холодной пресной воды требуют применения обычных теплотехнических аппаратов и машин — испарителей мгновенного вскипания, паровых турбин, конденсаторов.

Что такое солнечный пруд

Грубо говоря, солнечный пруд — это неглубокий (2—4 м) бассейн с крутым рассолом, у которого в нижнем придонном слое температура под действием солнечной радиации достигает 100° С и даже выше.

Физической основой возможности получения таких высоких температур вблизи дна пруда является подавление гравитационной конвекции — всплывания нагретой солнцем вблизи дна жидкости вверх под действием архимедовой силы, если плотность жидкости падает с ростом температуры. Чистая и слабосоленая (в том числе морская) вода подчиняется этому закону: по мере нагрева из-за термического расширения плотность уменьшается и нагретая вода всплывает вверх, отдавая тепло воздуху, а ее место замещает холодная. Устанавливается непрерывный процесс конвекции с переносом теплоты нагретого солнцем дна вверх и отдачей ее воздуху. Именно поэтому вода в море не нагревается выше 25—30° С.

В солнечном пруде такой конвекции нет, потому что у крутосоленого рассола по мере нагрева плотность повышается из-за роста растворимости соли в воде и этот эффект пересиливает действие расширения жидкости.

Механизм отдачи тепла от нагреваемого солнцем дна — это только теплопроводность через грунт вниз и слой неподвижной воды вверх. Основную часть энергии в солнечном спектре несут коротковолновые — видимые — и ультрафиолетовые лучи, которые слабо поглощаются водой и достигают дна. Теплопроводность существенно слабее конвекции, так что вблизи дна вода может нагреваться до упомянутых величин. Имеются сведения о получении температуры 102 и 109° С и расчетные предположения о возможности достичь 150° С в насыщенных рассолах. Разумеется, эти величины зависят от географической широты. Можно ожидать, что и на юге СССР летом в солнеч-

ном пруде достижимы 90—100° С. Но сезонные изменения инсоляции на этой широте уже весьма значительны, и, конечно, зимой средняя инсоляция много ниже летней, а следовательно, ниже и температура.

Физическую схему можно проиллюстрировать типичными данными для относительно небольшого солнечного пруда размером 200 × 200 м. На рис. 29 показан вертикальный разрез пруда и в виде физической схемы, и с точными конструктивными размерами. В верхнем слое пруда, который обычно имеет толщину $d = 0{,}1 \div 0{,}3$ м, подавить перемешивание жидкости не удается. Сказывается действие ветра, неравномерного загрязнения поверхности и других причин. Этот слой называется верхней конвективной зоной, и его толщина должна быть возможно меньше, чтобы снизить потери излучения, проходящего вглубь. То, что поглотилось в верхней конвективной зоне,— потери энергии, ибо она легко уносится с поверхности и ветром, и испарением.

Ниже находится градиентный слой толщиной D — именно здесь создаются «термоклин» и «галоклин» — резко неравномерное распределение и температуры, и солености при полном отсутствии перемешивания, если пруд работает устойчиво. От толщины этого слоя — неконвективной зоны — сильно зависят все характеристики пруда.

Наконец, в придонном слое находится зона накопления энергии, или нижняя конвективная зона, где допустимо перемешивание жидкости. Ее толщина также влияет на показатели пруда — в основном на его тепловую инерцию.

Полезной энергией пруда является тепловая, накопленная в нижней конвективной зоне. Ее можно использовать как для целей теплоснабжения, так и для выработки электроэнергии путем пропускания рассола из этой зоны через какие-либо теплообменники. На рис. 30 показана величина КПД пруда (η) — отношение отводимой теплоты к падающей на поверхность солнечной энергии.

Почти все, что нужно знать о технологии строительства соляного солнечного пруда, можно почерпнуть из книги Д. И. Менделеева «Основы химии». «Хлористый натрий,— пишет он,— или обыкновенная всякому известная соль находится в первичных породах земной коры, из них вымывается атмосферной водой, содержится в малых количествах во всяких текущих чрез них водах и собирается таким образом в океанах и морях. Такой процесс

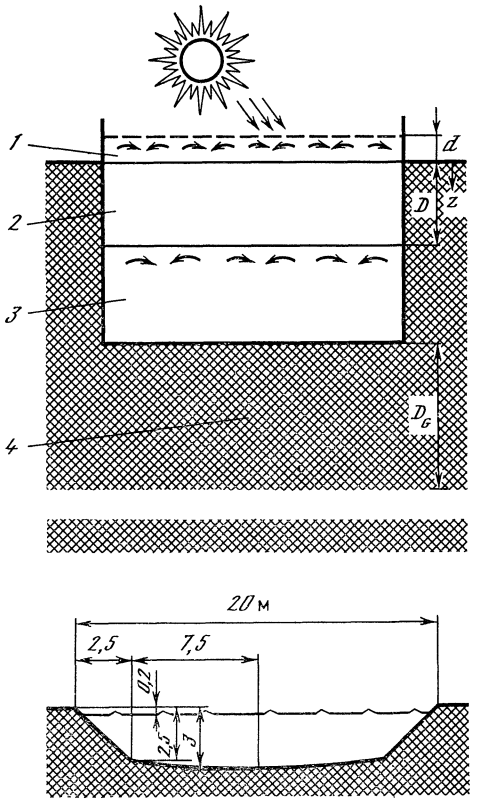


Рис. 29. Солнечный пруд в разрезе
1 — верхний конвективный слой,
2 — градиентный слой (неконвективный),
3 — нижний конвективный слой (зона накопления),
4 — грунт

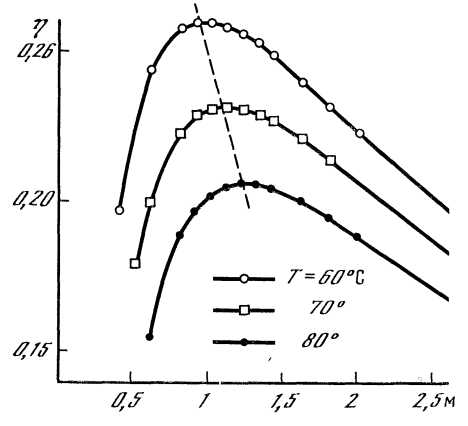


Рис. 30. Зависимость КПД солнечного пруда от глубины неконвективной зоны (*T* — температура рассола)

в долгое время жизни Земли скопил в океанах массу соли, потому что вода в них испарялась, а соль оставалась в растворе. Соль морской воды служит источником не только для прямого ее извлечения, но и для образования других масс добываемой соли, именно каменной соли и соленых источников и озер.

Извлечение соли из морской воды производят несколькими способами. В странах южных, в особенности на берегах Атлантического океана, Средиземного и Черного морей, для этого пользуются летними жарами. Избирают удобные низменные морские берега и на них устраивают целые ряды бассейнов, сообщающихся между собой. В верхние из таких бассейнов накачивают насосом или напускают во время прилива морскую воду. В таких бассейнах, иногда (лиманы) естественными косами или же искусственными насыпями отделяемых от остального моря, в апреле месяце начинается уже значительное испарение воды. По мере сгущения раствора его перепускают в следующие бассейны, а в верхний напускают новую воду или дают возможность соленой воде мало-помалу протекать чрез ряды бассейнов. Дно бассейнов, очевидно, должно быть по возможности непроницаемо для воды и для того убивается глиной. Когда сгущение достигнет содержания соли 28% (что соответствует 28° ареометра Бомэ), начинается выделение кристаллов поваренной соли. Ее выгребают и употребляют для всех тех надобностей, для которых идет поваренная соль. В большинстве случаев извлекают только первую половину хлористого натрия, могущего выделиться из морской воды, потому что вторая половина имеет уже горький вкус от примеси магнезиальных солей, выделяющихся вместе с поваренной солью» *.

Закончив цитату, отметим, что именно эти отходы от соляных производств, содержащие большую долю хлорида магния, используются сегодня в экспериментальных солнечных прудах. Чтобы предотвратить утечки, в настоящее время поверхность дна покрывают пластмассовой пленкой или слоем фурановой смолы. Иногда достаточно и той меры, о которой писал Д. И. Менделеев, когда дно «убивается глиной».

---

* *Менделеев Д. И.* Основы химии. СПб., 1889. С. 305.

Солнечные пруды в действии

Соленое озеро как аккумулятор солнечной энергии было предложено А. фон Калечицким в 1902 г., который обнаружил температуру 70° С на озере Мадве в Трансильвании.

С середины 50-х годов начались исследовательские работы в этом направлении в Чили и Израиле, затем в США, Индии, Саудовской Аравии, Австралии.

В настоящее время наибольший по площади пруд создан в Израиле вблизи Мертвого моря. Его площадь 250 тыс. м². На нем построена и испытана паротурбинная фреоновая энергетическая установка мощностью 5 тыс. кВт. Там же создан экспериментальный солнечный пруд с насыщенным раствором 95% хлорида магния и 5% хлорида кальция площадью 4 × 4,5 м, глубиной 0,9 м. Летом 1984 г. получена температура 98° С. Утверждается, что пруд такого типа может давать температуру в интервале 120—150° С. В 1978 г. с пруда площадью 7500 м² получена электрическая мощность 150 кВт.

В Австралии возле Мельбурна (38° ю. ш) построены два пруда глубиной 3 м, площадью по 1000 м² на грунте из водонепроницаемой глины. Один из прудов оставлен без теплоизоляции, другой имеет изоляцию из пенополистирола с пленкой из бутинола. Рассол представлял отходы от опреснения морской воды — смесь хлоридов магния и натрия. Для предотвращения потерь тепла с поверхности пруда применены плавающие пластмассовые кольца. Добавление соли производится путем естественной циркуляции за счет разности плотностей.

В Чили предложено использовать солончаковые плоскогорья, среди которых упоминается Атакама площадью 100 × 30 км. Еще в 1965 г. были детально разработаны схемы получения на солнечных прудах электроэнергии, пресной воды и соли.

В Египте на озерах Гарун и Марут построены небольшие демонстрационные пруды. Проводятся расчеты крупномасштабного строительства прудов в Каттарской впадине.

В США наибольший пруд в Майамисберге имеет площадь 2000 м². Пруд в пустыне Невада площадью 105 м², глубиной 2,5 м имеет среднегодовой КПД 9%. При отсутствии охлаждения температура в нем превышает 100° С (рекорд — 109° С).

В университете штата Огайо действуют три небольших пруда: 24 м² × 1 м, 200 м² × 2,5 м и 400 м² × 3 м.

Стоимость крупных солнечных прудов оценивается в 10 долл/м².

Фирмой «Монсанто» в США в 1977 г. построен пруд 54 × 36 × 3 м, дно выложено пластмассовой пленкой толщиной 0,7 мм. Загрузка 1100 т соли обеспечила концентрацию 18,5% в нижней конвективной зоне толщиной 2,4 м. Теплосъем осуществлен двухслойным трубчатым теплообменником площадью 138 м², установленным на расстоянии 1,5 и 1,8 м от дна. Удельная тепловая мощность 340 Вт/м², среднегодовой КПД 13%. Общая стоимость 70 тыс. долл.

В Индии в 1974 г. построены небольшие солнечные пруды. Показано, что при толщине неконвективной зоны 1,25 м оптимальный КПД отбора тепла составляет 32,4%, при 0,75 м — 25,2% и при 0,6 м — 21,5%. В Австралии создана модель бессолевого солнечного пруда со стабилизацией жидкости сотовой конструкцией с ячейками сот 1,25 × 1,25 см при толщине всей сотовой конструкции 10 см. В Англии испытана модель пруда тоже без соли, с покрытием поверхности воды теплоизолирующей жидкостью, которая не смешивается с водой (вазелин).

Приведем результаты испытаний упомянутой выше энергетической установки с паровой фреоновой турбиной, созданной вблизи Мертвого моря. Пруд собирает солнечную энергию на площади 0,25 км², а горячий рассол из нижней конвективной зоны пруда подается в теплообменник-испаритель — аналог котла на обычной ТЭС, где нагревает фреон. В турбине фреон передает мощность электрогенератору, затем конденсируется, отдавая сбросную теплоту циркуляционной воде, и насосом закачивается в испаритель. Это обычный цикл Ренкина всех низкотемпературных энергетических установок — геотермальных, океанских, утилизационных на влажном паре.

При испытании такой установки мощностью 5000 кВт в реальных условиях работы от солнечного пруда получены следующие результаты:

Температура рассола, °С	85
Расход рассола, м³/с	3,66
Температура охлаждения воды, °С	28
Расход охлаждающей воды, м³/с	3,66
Температура фреона перед турбиной, °С	75
Давление перед турбиной, ат	8,2

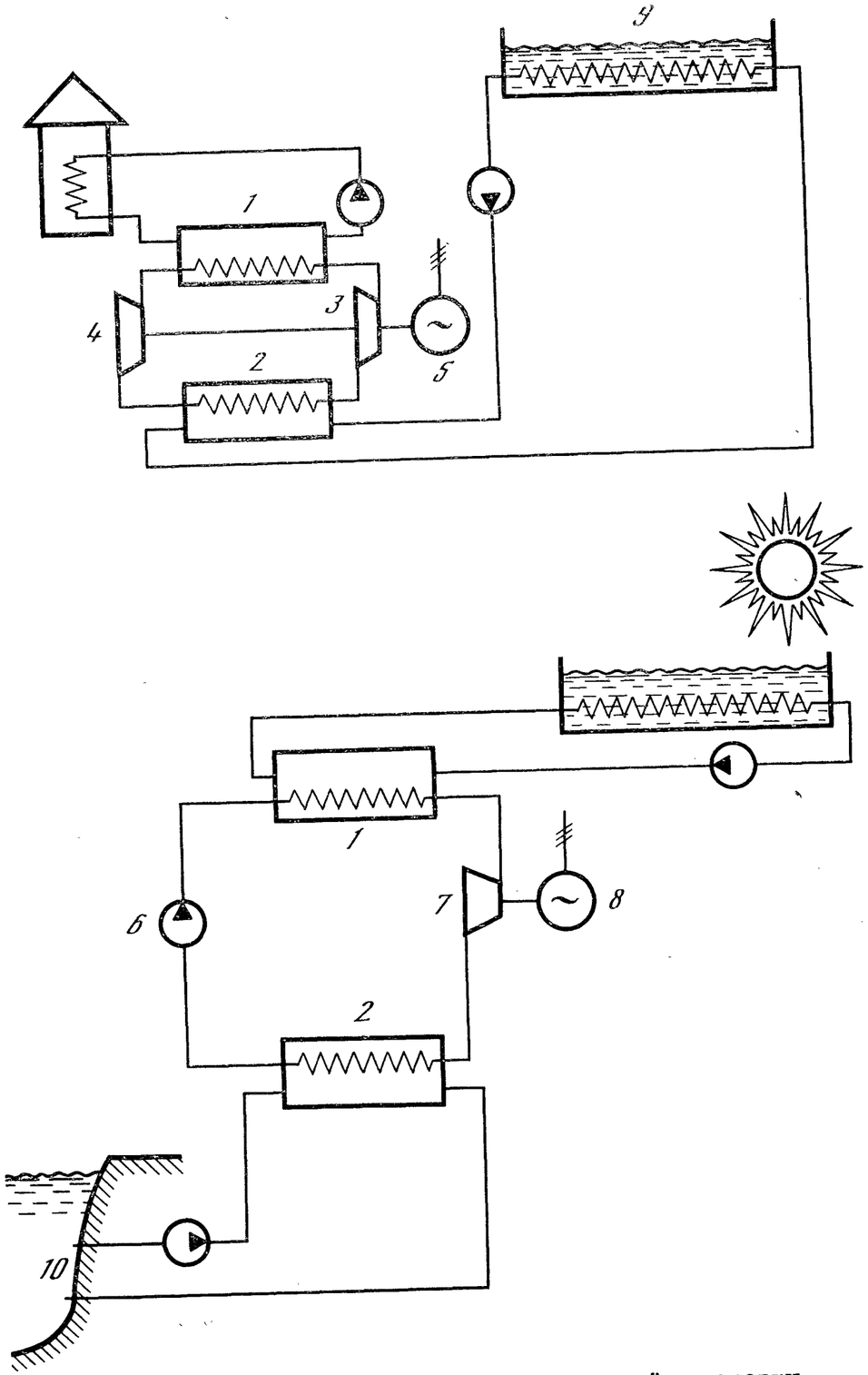
Температура конденсации, °С	34
Тепловая мощность, МВт	
испарителя	60
конденсатора	55
КПД турбинной ступени, %	93
Мощность генератора, кВт	5070
Общий КПД, %	7,12
Собственные нужды, кВт	
насос для фреона	350
насос горячего рассола	370
насос охлаждающей воды	320
прочие	30
Расчетные значения:	
КПД цикла Карно	41/348=0,17
Эксергетический КПД	0,0712/0,117=0,60

Эти испытания показали, что солнечный пруд действительно может стать одним из лучших возобновляемых источников энергии. Удельная электрическая мощность, полученная с 1 м² поверхности, 20 Вт.

Комбинированные солнечные прудовые установки для приморских районов

На широте 45° зимой довольно остро стоит проблема теплоснабжения — отопления жилья, обогрева теплиц, горячего водоснабжения и пр. В этих условиях наличие солнечных прудов с температурой около 50° С создает благоприятные возможности применения крупных теплонасосных станций взамен других источников тепла, главным образом котельных на органическом топливе.

Как известно, парокомпрессионный тепловой насос также имеет фреоновый контур и два теплообменника, как и установка прудовой солнечной электростанции, но он осуществляет обратный цикл Ренкина и вместо турбины в нем используется компрессор, а вместо насоса для подкачки жидкого фреона — детандер для срабатывания перепада давлений в фреоне. И в энергетической, и в теплонасосной установке турбина или компрессор занимают сравнительно мало места и по массе, и по объему, и по стоимости. Основное, самое тяжелое и дорогостоящее оборудование — это теплообменники. Такое же положение существует для всех установок, реализующих цикл Ренкина — как прямой, так и обратный, особенно в небольшом интервале температур. Поэтому представляется



Р и с. 31. Схема комбинированной прудовой солнечной установки

Вверху—зимний (теплонасосный) режим, внизу—летний (электрогенерирующий) режим. *1* — теплообменник (зимой — конденсатор, летом — испаритель), *2* — теплообменник (зимой — испаритель, летом — конденсатор), *3* — компрессор, *4* — детандер, *5* — электродвигатель, *6* — насос, *7* — турбина, *8* — генератор, *9* — солнечный пруд, *10* — морской водозабор

целесообразным совместить теплообменные аппараты прямого и обратного циклов, чтобы они были загружены почти круглый год, и создать комбинированную прудовую солнечную электроэнергетическую и теплонасосную установку, подключив параллельно по фреону компрессор и турбину к паре теплообменников с одной стороны, а насос для фреона и детандер — с другой (рис. 31).

Летом отключены компрессор и детандер, а зимой — насос и турбина. В летнем режиме солнечный пруд дает теплоту для горячего водоснабжения непосредственно и теплоту для нагрева фреона до 80—90° С и подачи в турбину. В отличие от схемы прудовой солнечной электростанции, где в качестве циркуляционной воды использовалась холодная вода верхней части пруда, для больших мощностей представляется необходимым иное решение. Конденсация требует обилия холодной воды, которую можно летом получить только с глубины моря, поэтому рассматриваемая схема фактически привязана к прибрежной зоне достаточно глубокого моря, например Черного, где на глубине 50 м и ниже круглый год температура 6—7° С. Получение электроэнергии от Солнца позволяет рассчитывать летом на экономию топлива за счет снижения мощности или отключения ТЭС на органическом топливе.

Но и зимой, несмотря на потребление электроэнергии из энергосистемы, рассматриваемая схема дает экономию топлива за счет вытеснения котельных на органическом топливе. Оценка экономии топлива при температуре источника низкопотенциального тепла 10° С составила около 30%. В рассматриваемой схеме при зимней температуре рассола из пруда 30—50° С экономия в сравнении с котельными будет существенно выше.

Географические условия для создания подобной энергетической установки ограничивают выбор площадки только прибрежными районами низких широт. В качестве примера рассмотрим район залива Сиваш. В настоящее время из-за значительного засоления хозяйственной деятельности в заливе нет. Циркуляционная вода в изобилии имеется вблизи — в Феодосийском заливе. Оценим масштаб максимальной летней мощности, допустив следующие параметры:

Температура, °С	
рассола	100
циркуляционной воды	8
кипения	94
конденсации	16

Температура, °С	
КПД цикла Карно	94—16/94+273=0,214
эксергетический КПД	0,5
общий КПД	0,107
Средняя летняя инсоляция, Вт/м²	250
КПД пруда	0,3
Плотность потока теплоты, Вт/м²	75
Удельная электрическая мощность, Вт/м²	75·0,107 = 8

Максимальный масштаб получаем, принимая возможность использования 50% площади залива Сиваш. Полная площадь 2560 км², следовательно, возможная площадь пруда 1250 км² и максимальная электрическая мощность $8 \cdot 1250 \cdot 10^6 = 10 \cdot 10^9$ Вт = 10 ГВт.

Разумеется, при реализации проекта возможно наращивать мощность постепенно, начиная с небольших южных участков залива.

Сопоставление цифр с полученными при испытании энергоустановки вблизи Мертвого моря показывает, что наши оценки реалистичны, а принятый эксергетический КПД 0,5 существенно ниже, чем достигнутый в эксперименте — 0,6. Сезонность выдачи электроэнергии в летне-осеннее полугодие не лишает эту схему интереса, поскольку гидроэлектрические станции фактически также сезонны — зимой воды гораздо меньше, чем летом. Если для приближенной оценки принять, что летняя выработка компенсирует зимнее потребление электроэнергии по расходу топлива, в итоге окажется, что все теплоснабжение региона осуществлено без затрат топлива — только за счет солнечной энергии.

Наличие действующих тепловых электростанций, которые должны работать только в базовом постоянном режиме, не противоречит применению рассматриваемой схемы, поскольку и прямой и обратный циклы весьма маневренны. Температура их невысока, и отсутствуют массивные детали, требующие длительного прогрева.

Площадка возле Сиваша представляется наилучшей для реализации, в первую очередь для решения задачи энергоснабжения Крыма. Но по климатическим условиям пригодны также районы Южной Украины, Одессы, Владивостока. Гидрологические исследования одесских лиманов дают основания рекомендовать в качестве естественных объектов для создания солнечных прудов все закрытые лиманы вблизи города—Хаджибейский, Дофиновский, Тилигульский и др. Их средняя глубина 2—4 м, измеренные вблизи дна скорости течений несколько см/с. Конечно, естественная соленость их недостаточна для солнечного пруда и должна быть многократно повышена.

С экологической точки зрения система прудовой солнечной—теплонасосной станций (СЭС—ТНС) представляется одним из наилучших способов энергоснабжения, ибо полностью исключает горение органического топлива летом, снижает его до минимума зимой. Она свободна от риска аварий, поскольку температура и давление рабочего тела не превышают 100° С и 30 ат.

Как показали подробные расчеты шведских и финских авторов, солнечный пруд с тепловым насосом способен эффективно аккумулировать и выдавать тепло при минимальной температуре 20° С даже на 60-й параллели при замерзании его поверхности зимой (или покрытии ее слоем полистирола).

В отличие от обычной солнечной электростанции с гелиостатами, где концентрация энергии достигается оптическими методами, солнечный пруд обеспечивает гидродинамическую концентрацию энергии. При средней плотности притока солнечной теплоты в отводимый нагретый рассол 75 Вт/м² плотность потока используемой энтальпии (произведение плотности рассола — 1500 кг/м³, его скорости в трубе — 1 м/с, теплоемкости — 2,3 кДж/кг °С и перепада температуры 10° С) составляет $3{,}5 \cdot 10^7$ Вт/м². Отсюда видно, что гидродинамическая концентрация повышает плотность потока энергии более чем на пять порядков, т. е. в сотни тысяч раз.

Но мы уже знаем, что способность к совершению работы характеризуется не потоком энергии, а потоком эксергии, и поэтому следует обратить внимание на концентрацию эксергии солнечным прудом.

Плотность потока эксергии солнечного излучения не намного ниже плотности энергии (примерно вдвое), так что его можно оценить средней величиной $\delta_0 = 100$ Вт/м². Это подводимая к пруду эксергия. Отводимой является эксергия горячего рассола, оцениваемая только по его температуре, т. е. термическая, а не химическая эксергия. При температуре горячего рассола 100° С и температуре холодного источника 10° С имеем

$$\delta_\varepsilon = 3{,}5 \cdot 10^7 \cdot (100 - 10)/(100 + 273) = 0{,}93 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2.$$

Отношение плотностей потоков подводимой и отводимой эксергии

$$\lambda = \delta_\varepsilon/\delta_0 = 10^7/10^2 = 10^5.$$

Иными словами, при отводе горячего рассола мы получаем гидродинамическую концентрацию потока эксергии в сто тысяч раз. Плотность потока эксергии в горячем рассоле много выше, чем при передаче энергии от горячих газов в хвостовых частях котельного агрегата, и выше, чем в океанских тепловых электростанциях. Поэтому солнечный пруд и представляется эффективным возобновляемым источником энергии благодаря высокой концентрации эксергии и ему уделяется так много внимания в этой книге.

Критическим сечением для потока энергии остаются теплообменники, в которых удельный тепловой поток составляет около 10^4 Вт/м^2.

Удельная масса крупных теплообменников вода—фреон составляет 45 кг/м^2 для высокого давления и 20 кг/м^2 — для низкого. Следовательно, для КПД = 0,1 их масса на 1 кВт электрической мощности составит $(45 + 25)/(0{,}1 \cdot 10) = 65$ кг/кВт. Масса компрессоров, турбины, насосов, паропроводов относительно невелика, и в сумме можно принять удельную массу оборудования

$$m = M/N_e = 100 \text{ кг/кВт} = 0{,}1 \text{ кг/Вт}.$$

Для оценки срока энергетической окупаемости ($t_{ок}$) приравняем количество сэкономленного за счет работы солнечной электростанции топлива $(N_e/\eta)\, t_{ок}$ и затраты топлива на создание оборудования массой M: $M \cdot Э$. Здесь η — КПД замещаемой ТЭС, Э — удельная энергоемкость оборудования (для стали 80 МДж/кг). Отсюда $t_{ок} = \eta m Э = 0{,}4 \cdot 0{,}1 \cdot 80 \cdot 10^6 = 3{,}2 \cdot 10^6$ с $\approx 0{,}1$ года. Срок этот существенно меньше срока службы, следовательно, прудовая солнечная электростанция многократно возместит затраты энергии на ее оборудование; но затраты энергии на трубопроводы могут быть очень велики, поэтому отдается предпочтение керамическим трубам, обычно применяемым в системах орошения.

Следует отметить, что во многих проектах рекомендуется применять не фреон, а изобутан — легкодоступную фракцию нефти или природного газа. Тогда возможно использование контактного теплообменника, в котором струи горячего рассола непосредственно контактируют с жидким изобутаном и испаряют его.

В сравнении с обычными ТЭС по металлоемкости оборудования прудовая солнечная электростанция проигрывает немного, ибо удельная масса пылеугольных энергетических котлов составляет 30 кг/кВт. Если же учесть все затраты металла, а значит, и энергии на топливный цикл и транспорт топлива, то преимущества прудовой электростанции налицо.

Энергия и пресная вода

Поток энергии от Солнца, сконцентрированный в солнечном пруде, позволяет решать задачу не только обеспечения энергией, но и не менее важную для пустыни задачу опреснения воды. Может возникнуть вопрос: а где же в пустыне соленая вода, которую надо опреснять? Оказывается, соленая вода, а также крутые рассолы имеются на относительно небольшой глубине или даже на поверхности в аридных зонах, т. е. вблизи пустынь. Достаточно вспомнить залив Кара-Богаз-Гол, Аральское море, озера Баскунчак и Эльтон, уже упоминавшийся нами залив Сиваш. А. Е. Ферсман выделил на территории СССР пустынно-озерный пояс, изобилующий солеными озерами, простирающийся от Причерноморской низменности через Северный Прикаспий, степи Западной Сибири и Казахстана до пустынь Южного Казахстана и Средней Азии.

Но гораздо бóльшие запасы соленых вод и рассолов находятся в глубине под пустынями (более того, можно утверждать, что почти вся вода на планете существует в виде рассолов различной крепости). Минерализация — характерная особенность подземных вод пустынь. Засоление происходит в результате растворения солей, содержащихся в соленосных породах, и минерализация достигает 50—100 г/л и более. В пустынной и полупустынной зонах СССР эксплуатационные ресурсы подземных соленых вод оцениваются в 1200 м^3/с, что соизмеримо с крупной соленой рекой.

Вообще, в земной коре солеродные бассейны имели огромные размеры. Кембрийский бассейн занимал почти всю Сибирскую платформу — 2 млн км^2, мощность соленосных отложений в нем достигала 3 км. Пермские солеродные моря также простирались на сотни тысяч квадратных километров. Они были достаточно глубокими, но период соленакопления — геологически коротким. Очень своеобразны рассолы Сибирской платформы. Солей в них бывает больше, чем воды,— до 600 г/л, причем растворимость сильно зависит от температуры: ее изменение от 0 до 20° С вызывает уменьшение солевого осадка с 6 до 1 см. Многие месторождения используются для солепромыслов и раз-

личных химических производств. В химической технологии имеется старинная и хорошо развитая отрасль — галургия. Типичными источниками крепких рассолов, используемых в галургии, являются месторождения Ходжа-Мумын и Камыш-Курган в Таджикистане, подземные хлоридные рассолы которых близки к насыщению [27].

Крепкие рассолы с содержанием хлорида магния до 29% используются при производстве бишофита для дефолиантов, применяемых в сельском хозяйстве. Следует отметить, что бишофит — кристаллогидрат, содержащий 6 молекул воды, при температуре 115° С испытывает фазовый переход и может служить веществом, аккумулирующим энергию.

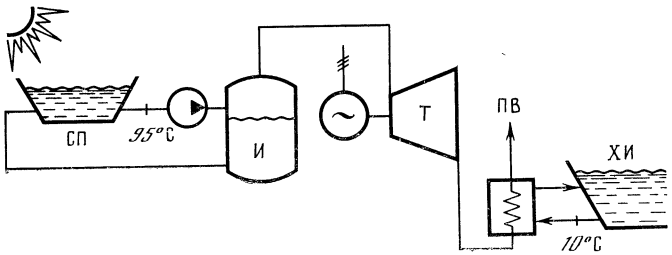
По современным представлениям [28], в настоящее время накопление высокоминерализованных грунтовых вод и солей в пределах бессточных впадин пустынных областей на юге СССР происходит в огромном количестве. В сравнительно небольшом районе, площадью около 17 тыс. км^2, примыкающем к северному берегу Каспийского моря (междуречье Волги и Урала), до глубины 20—25 м содержится около 500 км^3 грунтовых рассольных вод со средней минерализацией около 50 г/л. На всей же площади Юга СССР, характеризующейся знойным климатом, количество рассольных вод, формирующихся в современную геологическую эпоху в зоне свободного водообмена, измеряется многими десятками тысяч кубических километров.

Климат способствует накоплению рассолов и в наземных водоемах (озера, лагуны и др.). Так, например, в Сакском заливе минерализация составляет 27%, в Геническом — 29%, Красноперекопском — 25,5% в озерах Баскунчак, Эльтон, Индер, — по 26%, в Кордуанских — 40%, в озерах Карабатан и Аккуль — 30%, т. е. вполне достаточная для солнечного пруда. В концентрированном рассоле (рапе) Кара-Богаз-Гола с 1947 по 1961 г. общая минерализация увеличилась с 29 до 41%, в том числе хлорида магния — с 4,76 до 34,59% (в связи со строительством дамбы, отделяющей залив от моря, и регулируемым пропуском воды из Каспия состав солей мог измениться).

Приведенные данные показывают, что для создания солнечных прудов имеются как природные, так и технические рассолы нужной концентрации в неограниченном количестве. Они могут служить и как холодные источники при опреснении воды и получении электроэнергии в теплосиловых установках. Для получения 100 тыс. кВт электрической мощности и 300—600 л/с пресной воды требуется солнечный пруд площадью 4 × 4 км. В пустынях и их окружении площади, непригодные для иной хозяйственной деятельности, имеются в изобилии. Для приближенной оценки потребной площади солнечного пруда можно принять, что она всего в 10 раз больше, чем площадь пруда-охладителя на обычной тепловой электростанции той же электрической мощности.

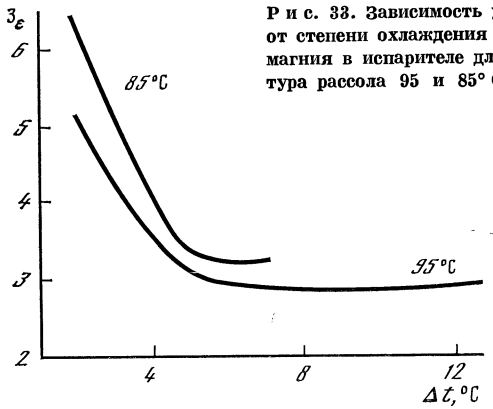
В создании мощных солнечных прудовых электростанций, по-видимому, может стать проблемой не горячий, а холодный источник, необходимый для конденсации пара. Этот вопрос легко решался в примере с заливом Сиваш, где рядом имеется глубокий Феодосийский залив с круглогодичной температурой 7° С на глубине 50 м. Но в континентальных пустынях на холодную морскую воду рассчитывать нельзя, и здесь представляют интерес как источники холода те же подземные рассолы, если они не нагреты геотермальным теплом. Разумеется, если рассолы горячие, их можно использовать и без солнечного пруда. Но это уже другая область энергетики — геотермальная. Она интенсивно развивается в последние годы и оказывается особенно успешной в тех случаях, когда из глубин земли вырывается насыщенный или даже перегретый пар. Такие электростанции есть в Италии, США, Сальвадоре и Японии. В СССР строится геотермальная электростанция. Однако здесь следует подчеркнуть, что масштабы солнечных прудовых электростанций могли бы существенно превысить масштабы развития геотермальных ТЭС, а гелиогидротехника в будущем по своим параметрам может превзойти обычную гидротехнику.

На рис. 32 показана схема комбинированного производства электроэнергии и пресной воды на основе солнечного пруда. Горячий рассол из нижней конвективной зоны пруда подается в испаритель — сосуд, где поддерживается пониженное давление (около 0,9 ат) при температуре рассола около 100° С. Отсюда поток пара подается в турбину низкого давления, в качестве которой принят цилиндр низкого давления от серийной паровой турбины ВК-100. Принято также, что расстояние от турбины до пруда составляет 1 км и до холодного источника — 5 км. Номинальная мощность этой части турбины около 30 МВт, но расчет ее для работы с солнечным прудом показал, что при том же расходе пара (300 т/ч) мощность будет примерно вдвое меньше. После конденсатора вся пресная вода поступает потребителю. В проектном расчете варьировалась величина перепада температуры рассола в испарителе,



Р и с. 32. Схема комбинированного производства электроэнергии и пресной воды на основе солнечного пруда: ‖ солнечная прудовая опреснительная электростанция — СПОЭС

СП — солнечный пруд, И — испаритель мгновенного вскипания, Т — турбина, ПВ — пресная вода, ХИ — холодный источник



Р и с. 33. Зависимость удельных затрат эксергии от степени охлаждения рассола 34%-ного хлорида магния в испарителе для схемы рис. 32. Температура рассола 95 и 85° С

однозначно связанная с расходом рассола при заданной мощности и температурой пара. Итог расчета в виде зависимости хорошо уже нам известной суммы удельных затрат эксергии СУЭЭКС от перепада температур рассола Δt приведен на рис. 33. Оказалось, что при $\Delta t = 6 \div 12°$ С величина СУЭЭКС $З_\varepsilon = 3$, что практически совпадает с этим же показателем для обычных тепловых электростанций. Это очень важный вывод.

Следует подчеркнуть, что затраты энергии на материалы для прудовой энергетической установки в решающей степени зависят от величины трубопроводов для подачи горячего рассола и холодной воды в конденсатор. Затраты мощности на собственные нужды (перекачку жидкостей), конечно, также зависят от расстояний до горячего и холодного источников. Они оказались на уровне 20% от мощности генератора. В целом по эксергии-нетто эта установка вполне приемлема.

Конечно, по одному только критерию СУЭЭКС нельзя принимать решение в пользу создания подобных установок, необходимы более подробные расчеты и по другим критериям. Но относительно малая величина СУЭЭКС, существенно более низкая, чем для солнечных электростанций с гелиостатами, говорит о преимуществах этой схемы. Получение же пресной воды, которая здесь является как бы побочным продуктом, но может стать и самым основным, вероятно, и окажется решающим фактором в будущем.

Таким образом, на основании проведенных ориентировочных оценок и зарубежного опыта в создании солнечных прудов можно наметить программу работ по борьбе с опустыниванием за счет потоков эксергии самой пустыни: солнечной радиации и подземных или наземных рассолов.

Энергетические масштабы здесь могут быть поистине огромными. Скажем, залив Кара-Богаз-Гол даже в его современном, сильно уменьшенном виде мог бы дать электрическую мощность порядка 50 млн кВт при использовании в качестве холодного источника воды с глубины соседнего Каспия. Химический состав его рапы с преобладанием хлорида магния, как уже отмечалось, вполне пригоден для этого.

По экологическим показателям, в сравнении с другими энергоисточниками солнечные прудовые электростанции предпочтительнее, поскольку фактически не имеют никаких выбросов, а слабый подогрев глубинной воды меньше сезонных колебаний и не должен оказать сколько-нибудь заметного влияния.

Особого внимания в качестве источника соли для создания солнечных прудов заслуживают потоки соленой воды, вызванные деятельностью человека,— так называемые дренажные стоки.

Гидрохимики обычно делят все потоки воды, способные выносить соли на сушу, на три группы: подземные, речные и дренажные стоки. Конечно, и подземные, и речные стоки могут нести сброшенные промышленностью отходы в виде солей или пестицидов. С этим борются службы экологического надзора. Но только третья группа стоков — дренажные вызваны человеком, поскольку сам

поток воды, а не только его загрязнения создается при орошении засушливых земель для нужд сельского хозяйства, в основном хлопководства.

Много ли соли выносят из почвы дренажные стоки? По свидетельству Н. Ф. Глазовского, «в результате развития орошения с дренажным стоком в области соленакопления поступает 95 млн т соли в год. В случае реализации различных водохозяйственных и мелиоративных программ... может произойти дополнительное поступление примерно 179 млн т солей за счет перераспределения части стока, дополнительного дренажного стока со вновь осваиваемых массивов орошения у нас в стране, а также увеличения минерализации речных вод вследствие сброса дренажного стока за рубежом. Общее соленакопление (исключая крупные озера и внутренние моря) составит 374 млн т солей в год. Поэтому возникает задача различных альтернативных вариантов утилизации дренажного стока.

Необходимо решить вопрос: что делать с этой огромной массой солей? При современных относительно небольших по площади массивах орошения этот вопрос решается нерационально: дренажные воды сбрасываются в пустыню, бессточные впадины и т. п. В случае дальнейшего расширения орошения это тем более не выход, так как «захороненные» таким способом соли снова будут вовлекаться в миграционные потоки на территории Средней Азии и Казахстана.

Необходимо изучить возможности частичного использования дренажного стока для выращивания галофитов, а также опреснения этих вод. По-видимому, наиболее рациональным будет создание каскадной системы орошаемого земледелия. На конечных ступенях каскада возможно опреснение высокоминерализованных дренажных вод и получение как пресных вод, так и солей» [29, с. 167].

Эта (по необходимости длинная) цитата показывает, сколь благоприятны объективно складывающиеся в Средней Азии природные условия для создания солнечных прудов с энергетическими и опреснительными установками.

В оценке масштабов создания солнечных прудов по выносу соли только дренажными стоками ограничимся оценкой Н. Ф. Глазовского — 100 млн т в год. На 1 м^2 пруда глубиной 2—3 м при самой высокой концентрации требуется около 0,5 т соли. Следовательно, площадь соляных прудов, вводимая ежегодно, могла бы составить

200 км^2. Принимая электрическую мощность 5 Вт/м^2 и выход пресной воды 0,02 г/с м^2, получаем годовой ввод электрической мощности 1 млн кВт, а по пресной воде — 4 м^3/с (годовой прирост). Отсюда видно, что прудовые установки, созданные на конечных ступенях каскадной системы орошаемого земледелия, способны принять и эффективно использовать весь вынос соли, отдавая при этом засушливым областям и электроэнергию, и пресную воду.

Однако не только дренажный сток может быть источником необходимой для прудов соли. Сравнительно слабосоленая вода бессточных озер в Средней Азии может в солнечных прудах разделяться на пресную и крепкие рассолы с одновременной выработкой электроэнергии. Приводимые ниже данные дают представление о возможных масштабах производства [29]:

Озеро	Объем, км^3	Минерализация, г/л	Солезапас, млн т
Иссык-Куль	1747,5	5,82	10158
Каракуль	26,6	8,1	215
Прочие горные	8,2	1,0	8,2
Алаколь	58,6	12	703
Балхаш	112,0	2,1	735
Арнасай	19,9	3,8	75
Сарыкамыш	17,0	8,3	141
Прочие равнинные	15,7	1—200	730

Уместно еще раз напомнить слова писателя Каинбергенова о том, что назначение огромного водоема среди песков — служить естественным солнцеприемником. Рассмотрев схему солнечного пруда и энергетической установки, мы видим, что гелиогидротехника дает человеку возможность создавать такие искусственные солнцеприемники или использовать естественные для возвращения природе «полного созвучья», о котором писал Тютчев.

Эксергия-нетто обосновывает возможность широкого развития работ в этом направлении.

Глава 9. Эффективно ли мы используем энергию?

Мне кажется, что искусство будущего так тесно сольется с наукой, что уже и теперь пришло для нас время узнать и полюбить лучших наших ученых — и Вас в первую очередь.

Из письма Н. А. Заболоцкого К. Э. Циолковскому

Коэффициент полезного использования

Эффективно ли мы используем энергию? Этот вопрос однозначно связан с другим: много ли энергии мы можем сберечь? Если ввести два безразмерных коэффициента: коэффициент полезного использования энергии

$$\text{КПИ} = \frac{\text{полезно использованная энергия}}{\text{вся затраченная энергия}} \qquad (77)$$

и масштаб энергосбережения

$$\text{МЭС} = \frac{\text{сколько энергии можно сберечь}}{\text{вся затраченная энергия}}, \qquad (78)$$

то очевидно, что в силу закона сохранения энергии коэффициенты, вычисленные и для конкретного объекта, и для всего энергетического комплекса страны, должны быть связаны так:

$$\text{КПИ} + \text{МЭС} = 1, \quad \text{или} \quad \text{МЭС} = 1 - \text{КПИ}. \qquad (79)$$

Для практических целей существенна не вся энергия, подводимая к объекту, а только та ее часть, которая связана с добычей и сжиганием топлива или другим потоком энергии от энергосистемы, т. е. тот поток энергии, который создается и подводится к объекту ценой больших затрат и топлива, и труда, и металла. Именно эта энергия считается затраченной и ставится в знаменателе равенства (77). В числителе же, как правило, используется сумма преобразованной энергии разных энергоносителей — электрическая и тепловая. Так вычислен коэффициент полезного использования энергии (назовем его КПИ_1), например, в статье академика Л. А. Мелентьева [26].

Он оказался равным около 37%, и при его определении в числителе просуммированы электричество и теплота, а в знаменателе — теплота сгорания всех видов топлива, добытого в стране, и эквивалентный топливный вклад от гидроэнергии.

Естественно, КПИ нужно повышать, что и является одной из главных целей энергетиков всего мира.

Но внимательный читатель здесь мог бы задать довольно много вопросов, сродни тем наивным вопросам, с которых начиналась книга, например:

1. Во многих странах для теплоснабжения широко применяются трансформаторы тепла (тепловые насосы), о которых шла речь и в нашей книге. В них втекает поток энергии из окружающей среды, который не учтен в КПИ_1. Что будет, когда и в СССР тепловые насосы получат широкое распространение? Ведь тогда в знаменатель КПИ_1 надо будет вводить новое и большое слагаемое?

2. Во всех технически неразвитых странах, где нет электростанций, величина КПИ_1 гораздо выше, чем в индустриальных, и призыв к повышению КПИ_1 может быть неверно истолкован. (КПИ_1 для котельной или для печи 0,6—0,8, а для электростанции не больше 0,4.) В чем тут дело?

3. Если продолжать не учитывать в КПИ_1 в знаменателе приток теплоты из окружающей среды, то при использовании эффективных тепловых насосов КПИ_1 ряда систем станет много больше 1. Как тогда определить масштаб энергосбережения (МЭС)?

Вопросы справедливы и показывают, что развитие техники, и в частности трансформации тепла, заставляет пересматривать наши традиционные способы расчетов эффективности использования энергии.

Тот же внимательный читатель может догадаться, что в расчетах КПИ нужно использовать не энергию, а эксергию. Тогда в знаменатель попадет только эксергия затраченного топлива, поскольку в теплоте из окружающей среды эксергии нет. В числителе же будет просуммирована эксергия теплоты и электроэнергия (численно равная эксергии):

$$\text{КПИ}_2 = \frac{\text{полезно использованная эксергия}}{\text{вся затраченная эксергия}}, \qquad (80)$$

и это совпадает с определением эксергетического КПД.

Чтобы понять, какова может быть численная разница между КПИ_1 и КПИ_2, проведем оценку по тем же данным

[26]. На долю механической и электрической мощности приходится 50% потребляемого топлива, и в этом случае эксергетический КПД совпадает с $КПИ_1$, поскольку эксергия топлива почти равна теплоте сгорания, а механическая и электрическая мощность совпадает с эксергией. Поэтому половина топлива используется с $КПИ_2 = 0{,}37$. Но другая половина топлива расходуется в печах и котельных, имеющих эксергетический КПД около 0,15, так что общее значение

$$КПИ_2 = 0{,}5 \cdot 0{,}37 + 0{,}5 \cdot 0{,}15 = 0{,}26,$$

т. е. существенно ниже, чем при расчете $КПИ_1$.

Если бы удалось с помощью различных технических мероприятий повысить эксергетический КПД тепловых процессов (систем теплоснабжения с котельными и печей) и довести до сегодняшнего уровня КПД силовых процессов (0,37), то при расходовании страной в год около 2 млрд т условного топлива экономия составила бы $(0{,}37—0{,}26) \cdot (2 \cdot 10^9) = 220$ млн т у. т. Это значительный масштаб и вполне технически оправданный путь к энергосбережению.

Оценки величины $КПИ_2$ всего энергетического комплекса дают представление о возможности экономии топлива за счет проведения крупных, в том числе и организационных, мероприятий. Они полезны и при сравнении эффективности использования энергии в разных странах. Но $КПИ_2$ не вполне удовлетворяет требованию уравнения (79), так как при вычислении его для конкретных объектов в нем фигурируют только текущие затраты и потоки преобразованной отводимой эксергии. Поэтому для уточнения понятия КПИ конкретного объекта следует учесть и затраты эксергии на его создание, т. е., кроме эксергетического КПД, еще и коэффициент эксергии-нетто. Оба они были подробно рассмотрены. Теперь мы можем дать окончательное выражение для КПИ, строго удовлетворяющее уравнению (79) для любых объектов:

$$КПИ_3 = З_\varepsilon^{min}/З_\varepsilon^{факт}, \qquad (81)$$

где $З_\varepsilon^{min}$ — минимальная сумма затрат эксергии по (60) и $З_\varepsilon^{факт}$ — фактический показатель для рассматриваемого объекта при традиционном варианте схемы и оборудования. Точно так же можно вычислить КПИ для всего топливно-энергетического комплекса страны и оценить полный масштаб энергосбережения.

Показывая, что фактически мы производим, передаем и сберегаем не энергию, а эксергию, мы оставили без внимания важный вопрос: а нужно ли беречь эксергию? Строго говоря, этот вопрос находится за пределами собственно энергетики, но он широко дискутируется в мировой литературе и дает возможность вспомнить о прозорливости высказываний вековой давности, поэтому и мы его коснемся.

В зарубежной литературе идет дискуссия между «креационистами» и «термодинамиками».

Первые утверждают, что все мероприятия по сбережению, если они вызывают ограничения, вредны. Самый важный ресурс человечества — интеллект, который всегда найдет решение возникающих проблем, и любые ограничения, в том числе на потребление энергии и демографическое развитие, ему в этом только мешают. Если говорить об энергетических ресурсах, то их еще вполне достаточно для развития человечества без ограничений. Если же вводить ограничения, например принудительное сокращение рождаемости, то человечество может потерять как раз тех гениев, которые и должны найти решение проблемы. (Для иллюстрации напомним, что Д. И. Менделеев был седьмым ребенком в семье, а известный итальянский писатель Луиджи Пиранделло — двадцать четвертым!) Надо дать возможность творить человеку, и он сумеет решить встающие перед человечеством проблемы, т. е. найдет пути к освоению новых ресурсов питания, воды, материалов и энергии, говорят креационисты.

Законы природы неумолимы, возражают термодинамики. Миллионную тонну нефти всегда трудней добыть, чем первую. Ру́ды металлов становятся все беднее. Десятое изобретение уже труднее сделать, чем первое. Размеры пахотной земли ограниченны, на них наступает пустыня, в том числе антропогенная. Отбросы производства все возрастают, а ни одно живое существо не может обитать в среде из своих отбросов. Все эти процессы — проявление второго закона термодинамики, о котором никогда не упоминают креационисты, значит, они судят о предмете некомпетентно. Поэтому человечество неизбежно должно будет вводить ограничения и на добычу энергии, и на рост населения.

Не беря на себя ответственности в признании правой какой-либо из сторон, автор хочет сосредоточить внимание

читателя только на энергетической стороне вопроса: что же на самом деле нужно беречь?

При рассмотрении дефицита ресурсов часто говорят, что ограничена не только энергия, но и другие ресурсы — руды, воды, пища и т. д. На это можно возразить, что в силу закона сохранения вещества ни вода, ни металлы, ни углеводы или компоненты белков с нашей планеты не исчезают. Происходит загрязнение воды, окисление металлов, сжигание или разрушение углеводов и белков, но составляющие их элементы, безусловно, сохраняются. С точки зрения термодинамики, эти процессы — возрастание энтропии, а значит, потеря эксергии. Если найден надежный источник эксергии, например солнечный, то всегда можно очистить загрязненную воду, восстановить железо из ржавчины, синтезировать углеводы, а в будущем — и белки.

Из того простого факта, что закона сохранения эксергии не существует, следует, что она и есть так называемый абсолютный ресурс, который надо беречь. Все остальные частные проблемы обеспечения ресурсами типа воды, руды и т. п. находятся в прямой зависимости от основного единственного ресурса — эксергии.

Мы уже говорили, что на нашу планету поступает энергия с коротковолновым излучением, а обратно в космос рассеивается длинноволновое излучение с более высокой энтропией, т. е. Земля получает от Солнца эксергию. Но в нынешней энергетике в основном используется не текущий поток эксергии Солнца, а прошлый, накопленный в запасах органического топлива за многие миллионы лет. Основная задача ближайших десятилетий состоит в том, чтобы, используя запасы эксергии топлива, разработать технологию преобразования текущих потоков эксергии Солнца. Можно надеяться, что органического топлива на это хватит.

И здесь нельзя не отметить удивительную прозорливость современника Н. А. Умова русского экономиста и физика С. А. Подолинского. В статье «Труд человека и его отношение к энергии», опубликованной в 1880 г. в петербургском журнале «Слово», он писал: «Не следует забывать, что каменный уголь есть запас солнечной энергии, собранный за громадный период времени, и что, потребляя его в большом количестве, мы вводим в наш бюджет случайно собравшиеся доходы прежних лет, а расчет ведем так, как будто мы действительно сводим концы с концами. Если бы мы посредством того труда, который идет на добывание каменного угля, умели фиксировать ежегодно такое же количество солнечной энергии на земной поверхности, которое равняется энергии добытого угля, тогда действительно весь этот труд мог бы считаться полезным» *.

В этой связи можно напомнить, что в расчетах возобновляемых источников энергии по эксергии-нетто (см. гл. 7) был определен их срок энергетической окупаемости из сопоставления затрат органического топлива на создание установки и экономии топлива при ее работе. Это близко к рекомендации С. А. Подолинского использовать уголь для разработки способов «фиксировать ежегодно такое же количество солнечной энергии».

Таким образом, можно попытаться объединить точки зрения «креационистов» и «термодинамиков», разделив их во времени.

Пока мы не умеем хорошо «фиксировать солнечную энергию» или, иными словами, пока у нас нет эффективных возобновляемых источников энергии, надо беречь эксергию органического топлива как абсолютный и невосполнимый ресурс, вводя при необходимости ограничения. Когда эта задача будет решена и появятся такие источники в виде прудовых солнечных электростанций, океанских тепловых электростанций, ветродвигателей и т. п., можно будет согласиться с креационистами и снять все ограничения. Но, повторим, в ближайшие десятилетия проблема энергосбережения, а точнее, экономного расходования топлива как запаса эксергии и электроэнергии как потока эксергии должна оставаться в центре внимания.

Энергосбережение уже оказывает очень сильное влияние на энергетическую политику промышленно развитых стран. В планах и программах развития энергетики появляются радикальные изменения, вызванные успехами в сбережении энергии. В частности, в США исследования последних лет показали, что повышение эффективности использования электроэнергии исключает надобность в строительстве новых электростанций с 1985 по 2000 г. Использование наиболее эффективных холодильников, кондиционеров, электроводонагревателей (из тех, что уже имеются в продаже) снижает потребность в электроэнергии на величину, эквивалентную 40 крупным атомным электростанциям. Только в штате Техас привели к эко-

* Цит. по: *Алексеев Г. Н.* Энергоэнтропика. М.: Знание, 1983. С. 80.

номии, эквивалентной работе 10 АЭС, мероприятия по энергосбережению с затратами 5 центов на 1 кВт·ч (стоимость электроэнергии от вновь вводимой АЭС составляет 20 центов/кВт·ч). Компания «Тенесси Вэлли» провела мероприятия по энергосбережению, которые дали экономию энергии, эквивалентную мощности крупной АЭС, в 1000 МВт. В Калифорнии с помощью разработанных мероприятий предполагают снизить пик нагрузки жилищного сектора на 31%, а с помощью разрабатываемых в настоящее время — на 56%. При этом подчеркивается, что внедрение новых экономных люминесцентных ламп, тепловых насосов и других энергосберегающих устройств, как правило, и стоит меньше, и проводится быстрее, чем строительство угольных или атомных электростанций.

Напомним, что и в нашей стране поставлена задача снижения энергоемкости национального дохода к концу века не менее чем в 1,4 раза. По-видимому, расчеты потоков эксергии позволят выбрать верные технические решения для достижения этой цели.

Одна из возникающих здесь задач — за что платить в энергетике. Дело в том, что отсутствие платы за землю и воду уже привело в нашей стране ко многим нерациональным для общества в целом техническим решениям. Здесь можно упомянуть затопление больших площадей водохранилищами равнинных рек или огромные ТЭЦ с тепловыми сетями в центре больших городов. Выдвигаются обоснованные предложения, что следует платить и за воздух, ибо чистый воздух тоже надо беречь. Вопрос о введении оплаты земли и воды уже обсуждается, но мы пока говорим только об оплате топлива и энергии.

В экономических расчетах тепловых электростанций в основном учитывается только оплата топлива, причем если речь идет об угле, то плата должна быть за единицу энергии в топливе, т. е. за тонну условного топлива (29,3 ГДж). При плате за тонну натурального топлива потребитель вынужден оплачивать и всю пустую породу, поступающую с углем. Об этом идут споры, но оплата условного, а не натурального топлива, к сожалению, в нашей стране еще не применяется.

Поскольку в период изменения хозяйственного механизма, по-видимому, порядок оплаты топлива тоже будет меняться, стоит подумать о дальнейшем радикальном улучшении (и упрощении) оплаты в энергетике. Надо платить не за энергию, а за эксергию. Для этого целесообразно ввести новую единицу — единицу эксергии «гиббс» (Ги) с таким определением:

1 Ги = 1 Дж эксергии.

Естественно, вводятся и кратные величины: килогиббс (кГи), мегагиббс (МГи) и т. д. Удельная эксергия будет измеряться в Ги/кг, а плотность потока эксергии — в Ги/с·м^2. Поскольку определение эксергии не сложнее определения энергии и ее, как мы уже знаем, всегда можно рассчитать по известным термодинамическим величинам, назначение тарифов за гиббс, а не за джоуль не должно вызвать недоразумений.

Упрощение при этом расчетов видно из сравнения тарифов на водяной пар. В настоящее время тарифы на пар высокого и низкого давления назначаются разными, ибо их энергетическая ценность различна. Приходится даже составлять таблицу тарифов для разных давлений. Назначение цены пара 2,64 руб./ГГи, что эквивалентно 11 руб./Гкал, не потребует никаких дополнительных таблиц, ибо по мере снижения давления в потоке пара и приближения его температуры к окружающей его эксергия снижается и число гиббсов в нем автоматически уменьшается. Когда мы оплачиваем энергию в потоке горячей воды, где эксергии очень мало (примерно четверть, так что число гиббсов в секунду вчетверо ниже числа джоулей),— это то же самое, что и плата за пустую породу в плохом угле, когда платим за «натуральную» тонну.

Разумеется, введение оплаты за эксергию важно не только из-за упрощения тарификации: оно будет способствовать сохранению того, что действительно бесследно исчезает, что, может быть, будет признано абсолютным ресурсом.

Понятно, что переход к новой единице эксергии и новому порядку оплаты — дело трудное и потребует много времени. Но сейчас настало время перемен.

Новые критерии эффективности и новые порядки оплаты, вероятно, будут полезны и позволят принимать правильные решения только при рассмотрении относительно мелких объектов и малого их числа, если они однотипны. Если же речь идет об очень крупных энергетических, металлургических, водохозяйственных и других проектах, то, вообще говоря, никакие численные критерии здесь нельзя считать достаточными и вполне надежными, особенно с учетом воздействия на природу и риска аварий.

Напрашивается такая аналогия. Многие области физики как науки начали развиваться только после того, как Декарт придумал «арифметизацию» пространства, приписав каждой точке пространства тройку чисел — декартовых координат. После этого появилась возможность создания аналитической геометрии, механики и т. д. Для принятия решений об эффективности по какому-либо критерию нужна «арифметизация» общественных желаний — оценка числом всего того, что общество хочет получить от проекта. Денежные приведенные затраты — это лишь одна из координат в «пространстве общественных желаний». Сюда же можно присоединить, например, вредные выбросы и сумму затрат эксергии, тогда получится трехмерное пространство, в котором находятся оптимальные траектории управления энергетикой (см. рис. 27). Могут быть и другие координаты — фактически вопрос об арифметизации общественных желаний, подобной арифметизации пространства, еще даже не обсуждался. Поэтому решение нельзя поручить ЭВМ, отыскивающей оптимальную траекторию,— координаты еще не выбраны.

Решения должны приниматься не только ведомствами и правительственными органами, но и всей общественностью. Для принятия крупных энергетических решений общесоюзного значения или при обсуждении вопросов об абсолютном ресурсе мнение специалистов-гуманитариев, людей искусства важно никак не меньше, чем специалистов в естественно-технических науках. До сих пор такое взаимодействие не налажено, но в перспективе, видимо, оно появится и окрепнет.

Заключение

Итак, мы видим, что потоки энергии и эксергии всегда сосуществуют. Они могут быть равны друг другу, если речь идет о потоках механической или электрической энергии, и очень сильно отличаться в потоках теплоты. Как правило, когда в быту или в широкой печати говорится об энергии, то на самом деле подразумевается эксергия.

Поток эксергии может быть больше, чем энергии, например в криогенной жидкости или холодном сжатом газе, поэтому нельзя считать, что эксергия — это часть энергии. Эксергия — это связанная с энергией, но другая функция. Поток эксергии теплоты, пропорциональный потоку энтропии, позволяет получить механическую или электрическую мощность в тепловых двигателях, в частности использующих термоградиенты в океане или солнечном пруде. Особый класс тепловых двигателей составляют диссипативные, в которых поток энтропии вызывает автоколебания поршня.

Совершенство разнообразных энергетических установок весьма просто и наглядно оценивается с помощью эксергетического КПД и эксергетических диаграмм. Весь энергетический комплекс от забоя и скважины до конечных потребителей энергии можно представить как процесс передачи эксергии от одного носителя другому с постепенным или резким ее исчезновением.

Введение особой единицы эксергии «гиббс» и назначение оплаты не за энергию, а за эксергию представляется уже необходимым мероприятием, хотя и трудным в осуществлении. В дополнение к денежным критериям для их лучшего обоснования рекомендуется новый критерий — сумма затрат эксергии, напоминающий по своей структуре приведенные денежные затраты. Расчет суммы удельных затрат эксергии (СУЗЭКС) не учитывает всех затрат (в частности, трудовых) и не использует денежных эквивалентов, характерных для экономического расчета.

В этом его достоинства и недостатки. Экономический расчет учитывает все компоненты народнохозяйственных затрат, но с неизбежной большой погрешностью из-за вариации денежных эквивалентов, например цен на топливо.

Расчет СУЗЭКС учитывает только одну компоненту — затраты эксергии, но позволяет это сделать с высокой точностью, так как оперирует только измеримыми физическими величинами. В расчете затрат эксергии учитывается различие видов топлива и их дефицитности, поскольку по мере истощения запасов непрерывно растут затраты энергии на добычу и транспорт топлива.

Термодинамический расчет обычного типа (только по текущим показателям) является неотъемлемым элементом технико-экономического расчета, давая информацию об энергетической компоненте текущих издержек производства. Расчет СУЗЭКС дает сведения о всех энергетических затратах на объект, а не только текущих и позволяет производить оптимизацию на минимум затрат первичной энергии. Поскольку структура показателей термодинамического и экономического расчетов стала одинаковой, можно проводить прямое сопоставление результатов на *C*-кривых, т. е. повысить точность обоих методов и вовремя выяснить причину расхождений. Затраты человеческого труда учитываются через затраты эксергии на инфраструктуру, например строительство поселка для электростанции и материальное обеспечение персонала. Эта доля затрат относительно мала и в будущем будет еще меньше.

Главное достоинство расчета СУЗЭКС — возможность предварительного принятия решений при сопоставлении новых, перспективных вариантов проектов энергоемких предприятий, когда денежные оценки затрат очень ненадежны. Можно сказать, что это критерий необходимый, но не достаточный.

Наконец, сопоставление решений на *C*-кривой и отыскание компромисса позволят выявить максимальную возможность энергосбережения с учетом экономической оптимизации.

Теперь попытаемся сформулировать ответы на вопросы, поставленные во введении.

Энергия действительно сохраняется, и беречь ее не нужно, но энтропия неизбежно возрастает, а эксергия уменьшается и может исчезнуть бесследно. Добываем мы не энергию, а вещества с большим содержанием эксергии. Беречь надо топливо как основной источник эксергии и электроэнергию как поток эксергии.

Производством электроэнергии мы называем передачу энергии от потока топлива потоку электрических зарядов. Чтобы получить заданный поток электроэнергии при минимальных затратах топлива, нужно и электростанцию, и всю систему ее снабжения топливом рассчитывать по методике эксергии-нетто. Отметим также, что новые, экологически приемлемые схемы использования солнечной энергии, накопленной в океане или солнечном пруде, при сравнении по эксергии-нетто выглядят лучше многих других энергоисточников.

Литература

1. *Умов Н. А.* Собр. соч.: В 3 т. М.: МОИП, 1916. Т. 3.
2. *Шаргут Я., Петела Р.* Эксергия. М.: Энергия, 1968.
3. *Бродянский В. М.* Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973.
4. *Андрющенко А. И.* Основы технической термодинамики реальных процессов. М.: Высш. шк., 1975.
5. *Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е.* Техническая термодинамика. М.: Наука, 1979.
6. *Хазен М. М.* Энергетика локомотивов. М.: Транспорт, 1977.
7. *Ruttley E.* Energy situation // ASCENT. 1981.
8. Экспресс-информ. / ЦНИИатоминформ. 1984. 11 окт., № 31977.
9. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда / Под ред. А. П. Александрова. М.: Энергоатомиздат, 1984.
10. *Hafele W.* Energy in a finit world. N.Y.: Ballinger, 1981.
11. *Yamauchi S., Fueki K.* New thermodynamic function // Proc. Intern. CODATA Conf., 1980. Oxford: Pergamon press, 1981.
12. *Scargut J.* International progress in Second Law analysis // Energy. 1980. N 8/9.
13. *Степанов В. С.* Химическая энергия и эксергия веществ. Новосибирск: Наука, 1985.
14. *Mitsui T., Ito F., Seya Y.* Outline of the 100 kw OTEC // IEEE Trans. Power Appar. PAS-102. 1983. N 9.
15. *Anderson J. H.* Ocean thermal power — the coming energy revolution // Sol. Wind Technol. 1985. N 1.
16. *Moody F. J.* Second law thinking // Proc. XXII Nat. Conf. Heat Transfear. N. Y.: ASME, 1984.
17. *Семяшова Л. М., Элькин А. И., Янтовский Е. И.* Об автоколебаниях проводящего поршня // Магнит. гидродинамика. 1974. № 4.
18. *Голенченко В. А.* и др. Исследование параметров автоколебательной системы с внешним тепловым воздействием // Инж.-физ. журн. 1975. № 1.
19. *Пономаренко А. В., Бродянский В. М.* Экспериментальное исследование термоавтоколебательного насоса // Холодил. техника. 1982. № 12.
20. *Mozurkewich M., Berry S.* Optimization of a heat engine based on dissipative system // J. Appl. Phys. 1983. N 54 (7).
21. *Капица П. Л.* Физика и энергия // Эксперимент, теория, практика. М.: Наука, 1981.
22. *Le Goff P., Giuilieti M.* A new energy — cost characteristic diagram // Proc. XIV Symp. ICMT. Doubrovnik. 1983.
23. *Янтовский Е. И.* Энергия-нетто // Пром. энергетика. 1985. № 1.
24. *Брусковский Б. Е., Гладунцов А. И.* Сопоставление эффективности утепления зданий // Достижения и перспективы. Вып. 32. (Энергетика, топливо. 1984. № 6).
25. *Chapman P. F.* Energy content and availability of metals // IEEE Proc. 1983. N 6. pt A.
26. *Мелентьев Л. А.* Энергетический комплекс СССР. М.: Экономика. 1983.
27. Переработка природных солей и рассолов: Справочник / Под ред. И. Д. Соколова. Л.: Химия, 1985.
28. *Зайцев И. К.* Гидрогеохимия СССР. Л.: Недра, 1986.
29. *Глазовский Н. Ф.* Соленакопление в аридных зонах СССР. М.: Наука, 1987.

Оглавление

Введение 3

Глава 1. Теорема Умова

Вектор потока энергии 9
Прогноз Умова 15
Современные энергетические прогнозы 18
Несколько примеров 20

Глава 2. Эксергия

История с воздушным шариком 25
Определение понятия «эксергия» 26
Расчет эксергии 28
Химическая эксергия 30
Эксергетический вектор 34
Потери эксергии 37
Значение эксергии 40

Глава 3. Добыча из океана

Эксергия океана 43
Океанская тепловая электростанция 46

Глава 4. Термоавтоколебания и диссипативные двигатели

Цикл Карно нереализуем 50
Сходство механического и термического трения 52
Диссипативный двигатель 55

Глава 5. Эксергетический КПД

КПД — отношение потоков 61
Поток эксергии угля и его потери 66
Тепловой насос 67
Теплота и холод 70
КПД по энергии и по эксергии 72

Глава 6. Диаграммы потоков эксергии

Компоненты потоков 75
Электрокотел 76
МГД-генератор 77

Глава 7. Эксергия-нетто

История объекта 82
Эксергетический прейскурант материалов 84
Критерий СУЭЭКС 87
Энергетическая окупаемость бестопливной энергетики 91
Проводник с током 94
Униполярный электродвигатель 97
Аккумуляторы для использования провальной энергии в энергосистемах 98
Котел-утилизатор 99
Построение *C*-кривой 101

Глава 8. Эксергия против пустыни

Наступление пустынь 108
Что такое солнечный пруд 111
Солнечные пруды в действии 115
Комбинированные солнечные прудовые установки для приморских районов 117
Энергия и пресная вода 123

Глава 9. Эффективно ли мы используем энергию?

Коэффициент полезного использования 130
Эксергия — абсолютный ресурс 133

Заключение 139

Литература 142

Научно-популярное издание

Янтовский Евгений Исаакович

ПОТОКИ ЭНЕРГИИ И ЭКСЕРГИИ

Утверждено к печати
редколлегией серии «Научно-популярная литература АН СССР»

Редактор издательства **Н. Б. Прокофьева**
Художник **А. Драговой**. Художественный редактор **И. Д. Богачев**
Технический редактор **А. С. Бархина**
Корректоры **В. А. Алешкина, Л. И. Кириллова**

ИБ № 37164

Сдано в набор 23.03.88. Подписано к печати 02.09.88. Т-15983.
Формат 84×108¹/₃₂. Бумага книжно-журн. Гарнитура обыкновенная.
Печать высокая. Усл. печ. л. 7,56. Уч.-изд. л. 7,9. Усл. кр. отт. 7,98
Тираж 7 400 экз. Тип. зак. 1674. Цена 30 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
117864, ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90

2-я тип. изд-ва «Наука» 121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 6