

Из истории техники и технических наук

В. Л. ГВОЗДЕЦКИЙ

САДИ КАРНО И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

От редакции

В 1996 г. исполнилось 200 лет со дня рождения выдающегося французского ученого Никола́ Леонара Сади Карно (Sadi Carnot, 1796–1832). Блестящий исследователь, инженер, офицер, он прожил недолгую, но яркую и динамичную жизнь. Его научные свершения теснейшим образом связаны с семьей, окружением, средой, эпохой. Отец Лазар Никола Карно, политик, ученый, инженер, стоял у истоков Политехнической школы в Париже. Из стен знаменитого учебного заведения вышли Л. М. А. Навье, Огюст Коши, Г. Кориолис, Ж. В. Понселе, другие знаменитые математики, механики, инженеры. Воспитанником Политехнической школы был и С. Карно. Блестящее образование, талант, целеустремленность, жажда новых знаний и открытий, наконец, благоприятные социальные обстоятельства предопределили все то, что было содеяно молодым ученым и что поставило его в один ряд с наиболее известными и чтимыми деятелями мировой науки.

Научное наследие С. Карно разработано достаточно глубоко и обстоятельно. Однако это касается в основном фундаментальных, базовых начал термодинамики, изложенных в главном труде ученого «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развить эту силу» (1824 г.). В оригинале эта работа озаглавлена «*Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a developper cette puissance*» par S. Carnot, Paris, 1824.

Производственно-прикладная компонента наследия С. Карно исследовалась реже и меньше. Излишне доказывать, что практический аспект изысканий ученого представляет собой не меньшую значимость, чем собственно его теоретическо-концептуальные построения. Здесь уместно напомнить, что свою деятельность С. Карно начинал именно как инженер, занимающийся поисками путей повышения эффективности работы паровых машин.



Никола Леонар Сади Карно

В еще меньшей степени исследованы вопросы взаимообусловленности развития фундаментальной науки, прикладных знаний и производства в контексте наследия ученого. При этом теоретические построения С. Карно способствуют не только изучению триады «физика — прикладные науки — практика», но и получению комплекса новых знаний в области самих технических наук (разработка проблем дисциплинарной иерархии, определение границ и содержания исследовательского пространства, формирование структурно-функциональных схем и моделей и др.). Именно этим наименее изученным вопросам и посвящена предлагаемая статья В. Л. Гвоздецкого.

В анналах науки и техники есть имена, величие и бессмертие которых связано с каким-либо изобретением или открытием. Примером тому служит знаменитый французский ученый и инженер Сади Карно. В сознании современников и потомков он, в первую очередь, утвердился как основоположник и создатель базовых начал термодинамики.

В области прикладных знаний и производственной практики имя Карно неразрывным образом связано с термодинамическим циклом — инженерно-теоретической основой всей теплоэнергетической индустрии XIX и XX столетий. Каков же реальный вклад исследователя в развитие теплотехники? Каковы суть и масштабы содеянного, поставившие Карно в один ряд с наиболее известными и чтимыми именами ученых и инженеров? Для ответа необходимо обратиться к истории зарождения и развития паровой машины, той системе представлений и знаний о теплоэнергетическом производстве, которая господствовала во второй половине XVIII в. и которая, в конечном счете, подготовила и предопределила все то, что было позже сделано С. Карно.

1. Паровая машина и предшественники С. Карно

Возникновение потребности в теплоэнергетике относится ко времени становления и развития горнорудного производства. Именно здесь наиболее остро проявился кризис гидроэнергетики. Технология производства предусматривала как необходимое условие наличие в одном географическом пункте трех производственных компонентов: топлива, руды и носителя гидравлической энергии. Однако стационарный характер источника гидроэнергии, а также дороговизна транспортировки угля и руды затрудняли обеспечение этого условия. Ограниченность возможностей гидроэнергетики особенно проявлялась в рудничном водоподъеме: мощный водный источник должен был соседствовать с рудным месторождением. Этот недостаток гидроэнергетики обусловил возникновение потребности в принципиально ином энергоносителе и использующих его технических средствах, функционирование которых не зависело бы от местных условий. Реализация потребности в новом виде энергии базировалась на открытии и изучении в XVII в. атмосферного давления, способности жидкостей и газов расширяться при нагревании, возможности подъема воды давлением пара.

Значительный технический опыт был вынесен из многовековой гидроэнергетической практики. Разработка элементов привода (валов, подшипников, колес зацепления), передаточных систем, изыскание оптимальных конфигураций лопаток водяных колес закладывали основы технологического и конструктивно-технического знаний. Но эти знания относились только к области трудовых операций и носили чисто эмпирический характер. Тем не менее, запас приемов, самих практических навыков был значительный.

Следовательно, наряду с потребностью в новом виде энергии и возможностью ее реализации, базировавшейся на естественнонаучных открытиях XVII в., имелся значительный опыт конструирования различных механизмов — эмпирическое техническое знание. Слияние воедино всех трех факторов и положило начало развитию теплоэнергетики.

Создание ранних тепловых двигателей, получивших практическое применение, относится к первой половине XVIII в. и связано с именами Т. Севери, Д. Папена, Дж. Смитона и др. (подробнее см. [1]). Конструирование паровых установок носило в

этот период исключительно опытный характер. Лишь эпизодически конструкторами использовались отдельные эмпирически полученные расчетные зависимости.

Зарождение расчетных приемов конструирования тепловых установок связано с именем замечательного русского изобретателя И. И. Ползунова. В его докладной записке о проекте огнейдействующей машины есть, в частности, два раздела — «О вычитании силы» и «О сложении машины». В первом разделе в зависимости от усилий, действующих на поршни и необходимых на рукоятках мехов, определяются основные габаритные размеры машины. Во втором разделе было рассчитано количество металла, нужное для ее постройки. По словам биографа Ползунова И. Я. Конфедератова, — «Расчет проведен методом, ничем не отличающимся от современного. Был подсчитан объем металла по размерам деталей... затем по удельному весу Металла найдено его весовое количество. Подсчеты Ползунова сопровождаются технико-экономическими обоснованиями, показывающими ...глубокое знание технологических и эксплуатационных процессов производства» [2, с. 129–130].

Огромный вклад в развитие теории паровой машины внес английский изобретатель Дж. Уатт. Его деятельность предопределила и обусловила все то, что в дальнейшем было сделано С. Карно для развития теплоэнергетической науки и практики. Начав с работы по ремонту модели паровой машины Ньюкомена–Коули в университете в Глазго, Уатт увенчал свой творческий путь созданием универсального теплового двигателя. Им были впервые разработаны и реализованы на практике такие важные конструктивные и технологические решения, как отделение конденсатора от цилиндра двигателя, прекращение впуска пара в цилиндр на более ранней стадии и расширение пара на значительной части хода поршня, введение попеременной подачи пара с помощью золотника в различные полости цилиндра, применение махового колеса, центробежного регулятора скорости и так называемого «параллелограмма Уатта» для передачи движения от поршня к балансиру. Все эти нововведения были предопределены необходимостью совершенствования теплового двигателя и в первую очередь повышения его экономичности.

Что же конкретно внес Уатт в становление теории паровой машины? Им выполнено немалое количество чертежей, представляющих собой проектно-конструктивные проработки как двигателей в целом, так и их отдельных узлов и деталей. В заявке на патент на применение расширения пара в цилиндре паровой машины этот процесс впервые представлен графически в виде диаграммы давления, изменяющегося по ходу поршня [3, с. 148]. Таким образом, Уаттом заложены основы графического изображения функционирования тепловых двигателей и параметрического анализа изменения состояния рабочего тела.

Необходимо сказать, что Уатту принадлежит также авторство идеи съема индикаторных диаграмм и первых опытов ее реализации.

Чрезвычайно быстрое распространение паровых машин во второй половине XVIII в. предопределило решение комплекса проблем, связанных с унификацией и стандартизацией размеров и конструкцией агрегатов, выработкой норм их производства и созданием специализированной машиностроительной индустрии. Для перехода от единичных разработок к поточно-массовому конструированию Уатт выработал целую систему формул. Еще не имея математической символики, они представляли собой лишь словесное описание. Например, для определения необходимого расхода воды в котле предписывалось: «Умножить квадрат диаметра цилиндра на путь, проходящий поршнем в минуту в футах, и разделить полученное произведение на 288000; частное дает количество воды, испаряемое в минуту в кубических футах» [4, с. 70]. Другой пример. Необходимое количество угля определялось по следующему правилу: «Расход угля на 1800 ходов машины равен произведению объема цилиндра в кубических футах на давление на поршень в фунтах на квадратный дюйм» [4, с. 70]. Эти и другие словесные формулы составляли рецептурную систему норм и правил, хотя и правомерных лишь для машин Уатта, тем не менее позволявших в пределах данного конструктивного ареала систематизировать и унифицировать разработку и производство двигателей в соответствии с их геометрическими размерами и параметрами.

Важнейшей чертой творчества Уатта является его экспериментальная деятельность. Это, кстати, характерно и для Карно, о чем будет сказано ниже. Главной побудительной силой была низкая эффективность машин и, как следствие этого, большие расходы топлива. Уатт исследовал свойства водяного пара, провел серию опытов по изучению теплоты парообразования, на основании эмпирических данных проанализировал взаимосвязи между давлением и температурой водяного пара.

По целевым установкам изыскания Уатта, как позже и Карно, носили производственно-прикладной характер. Исследования имели не научно-познавательную, а строго утилитарную направленность, вытекавшую из необходимости решения ряда практических вопросов. На основании опытных данных были получены графические зависимости и выведены первые эмпирические формулы–рецепты, что содействовало становлению теории паровой машины.

Полученный материал составил определенную основу для формирования естественно-научного теоретического знания. Здесь необходимо отметить, что на первых этапах развития теплотехнических наук переток знаний, научных импульсов шел от практики, а не к ней. Естествознание отставало как в плане фактического материала, так и концептуальных построений, гипотез, теорий. Изобретения Уатта имели большое значение для оживления естественнонаучной мысли.

Основное теоретическое решение Уатта, — отмечается в биографии ученого, — завершение и теоретического, и реального цикла парового двигателя путем введения в паросиловую установку конденсатора... исходило из правильного понимания процесса парообразования и конденсации как смены состояний одного и того же рабочего тела, переводимого по желанию конструктора из жидкого состояния в газообразное, а из газообразного в жидкое [3, с. 71].

Другими словами, Уатт, введя конденсатор, языком практики сформулировал важнейшее положение термодинамики о возникновении движущей силы повсюду, где имеется разность температур.

Мысль о том, что Уатт впервые материализовал и воплотил на практике основополагающую сформулированную впоследствии С. Карно концепцию термодинамики, развита в ряде работ по истории науки. В одной из них говорится:

Использование конденсатора (речь идет об установке Уатта. — В. Г.) расчленило машину на ... нагреватель, рабочее пространство и холодильник. При этом ясно обнаружили основные факторы перехода тепловой энергии в механическую. Термодинамический процесс получил ... наглядное воплощение. Практика подошла к тому, что ... черты термодинамического процесса четко обозначились в действии паровой машины Уатта. Так через практику вычленился объект научного исследования [5, с. 102].

Таким образом, языком практики было сказано то, что еще только предстояло изложить С. Карно в его знаменитом мемуаре «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824). А пока что термодинамические положения не были открыты и сформулированы учеными. Функционирование паровых машин не рассматривалось как форма реализации естественнонаучных процессов природы и законов их протекания. Отсутствие термодинамической теории исключало возможность научного обоснования работы любой теплосиловой установки. Поэтому не было и не могло быть не только целостной теплотехнической теории, но и сформировавшейся науки о тепловой машине.

Однако создателями первых паровых двигателей и особенно Уаттом были заложены отдельные большие массивы в основание будущей теории: создана рецептурная система конструирования, разработаны методы графической интерпретации и фиксации рабочих процессов, введены в практику единицы измерений важнейших параметров тепловых двигателей, проведены обширные эмпирические исследования свойств водяного пара.

В дальнейшем на строго эмпирической основе были составлены таблицы, построены графики и выведены первые формулы для нахождения функционально-технических

и морфологических характеристик двигателей (подробнее см. [1]). Эти математические описания представляли собой как бы отдельные островки будущей теории. Усилиями Ж. В. Понселе и др. формализованные описания постепенно были объединены и систематизированы. Так, Понселе с помощью введения поправочных коэффициентов решил проблему унификации формул, с тем чтобы их можно было использовать для различных категорий машин. Одновременно начинают разрабатывать вопросы динамики и прочности паровых машин.

Таким образом, в первые десятилетия XIX в. успешно развиваются отдельные направления теории паровых машин. Общей, объединяющей эти ветви характеристикой являлась по-прежнему их полная производственно-эмпирическая детерминация. Это, в свою очередь, предопределяло, во-первых, их фрагментарность, а во-вторых, сугубо утилитарно-прикладное значение. Коренные изменения в теории паровой машины связаны с именем французского инженера и исследователя С. Карно.

2. Исследования С. Карно и формирование теории тепловых двигателей

Первоначально изыскания Карно были обусловлены неудовлетворительными производственными характеристиками паровых машин и вытекавшей отсюда необходимостью снижения удельных расходов топлива и повышения КПД тепловых установок. Его знаменитый мемуар «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» [6] содержит полученный им обширный экспериментальный материал о паровых двигателях. В работе приводятся данные о потреблении топлива тепловыми установками, доказываются выгоды применения высоких давлений и расширения пара, эффективность использования машин многократного расширения. Однако отнюдь не в этом заключается главная ценность мемуара Карно.

В процессе экспериментальных исследований паровых машин и анализа их эффективности перед Карно встал вопрос о природе процесса, лежащего в основе получения механической энергии в паровой машине, о естественнонаучной основе, физическом принципе действия теплового двигателя вообще. Исключительно важной представляется методологическая сторона решения поставленной исследователем проблемы. От анализа работы отдельных конкретных паровых машин Карно перешел к рассмотрению некоторой абстрактной теоретической модели, синтезирующей в себе все многообразие тепловых двигателей и их рабочих тел.

Чтобы рассмотреть, — писал он, — принцип получения движения из тепла во всей его полноте, надо его изучить независимо от какого-либо механизма, какого-либо определенного агента; надо провести рассуждения, приложимые не только к паровым машинам, но и ко всем мыслимым тепловым машинам, каково бы ни было вещество, пущенное в дело, и каким бы образом на него не производилось воздействие [6, с. 19].

Переход с конкретно-эмпирического уровня на уровень теоретических абстракций содействовал получению ученым ряда максимально широких и в научно-познавательном, и в утилитарно-прикладном планах выводов.

В своей работе Карно впервые сформулировал основополагающие принципы как общей теории тепловых двигателей, так и термодинамических законов в целом. Приведем несколько его высказываний. «Возникновение движущей силы, — отмечает ученый, — обязано в паровых машинах не действительной трате теплорода, а его перехода от горячего тела к холодному» [6, с. 20]. Далее он замечает, что «...недостаточно создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добавить холод; без него теплота стала бы бесполезна» [6, с. 20]. И, наконец, Карно декларирует: «повсюду, где имеется разность температур, может происходить возникновение движущей силы» [6, с. 22]. Так была впервые сформулирована сущность второго закона термодинамики. Помимо этого, Карно впервые вводит в научный оборот понятие кругового процесса — так называемый «цикл Карно» (рис. 1), условий его обратимости, представление об идеальном цикле паровых двигателей.

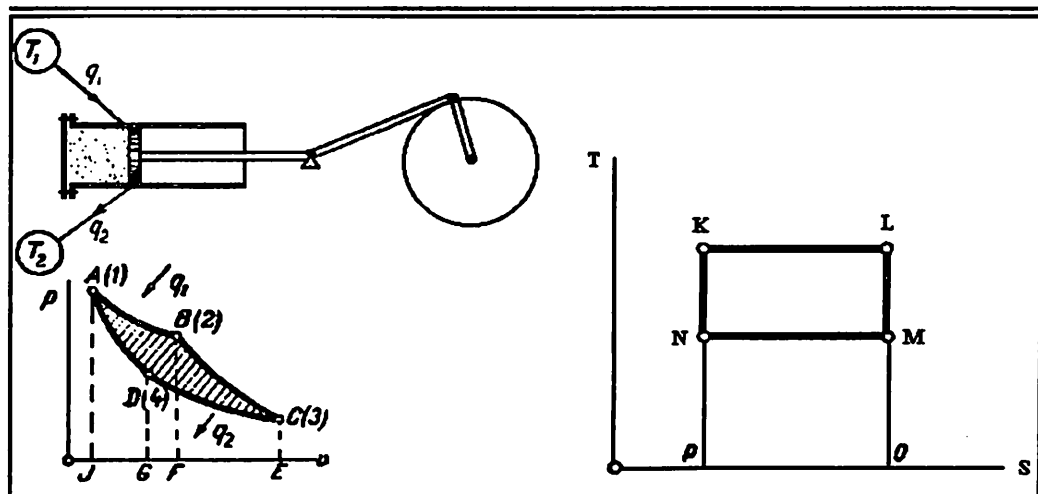


Рис. 1. Цикл Карно в PV- и TS-диаграммах

Условные обозначения:

В PV-диаграмме: q_1 — подведенное тепло; q_2 — отведенное тепло; площадь ABCDA обозначает работу цикла.

В TS-диаграмме: площадь KLOPK эквивалентна подведенному теплу; площадь NMOPN — отведенному теплу

Концептуальные построения Карно получили дальнейшее развитие в работах Р. Клаузиуса, У. Томсона и других. Идеи французского изобретателя, носившие в целом лаконично-тезисный характер, были детализированы, уточнены и частично исправлены. Так, понятие о двух источниках температур как необходимом условии получения работы было расширено и конкретизировано Клаузиусом в результате развития принципа перехода в работу части тепла, определяемой разницей температурно-тепловых уровней. Количество тепла на верхнем уровне больше количества тепла на нижнем уровне на величину полученной внешней работы. Другими словами, теплота, заимствованная от источника высшей температуры, Q_1 частично перейдет к источнику тепла нижней температуры (Q_2), а частично обратится в работу Q , т. е. $Q_1 = Q_2 + Q$ [7, с. 129]. Данный основополагающий постулат термодинамики опровергал как теорию теплорода, которой придерживался Карно, так и его ошибочную точку зрения, согласно которой, совершение работы посредством тепла связано только с понижением температуры рабочего тела, но отнюдь не с трансформацией в работу некоторого количества теплоты.

Введенное впервые Карно понятие кругового процесса в дальнейшем углублялось и совершенствовалось. В отличие от французского исследователя, давшего лишь текстовое описание цикла, Клапейрон применил его графическое изображение. Дальнейшее изучение кругового процесса, его теоретическое осмысление, графическая интерпретация и математическое описание содержатся в знаменитой работе Р. Клаузиуса «Механическая теория тепла» (Подробнее см. [7, с. 128–155]). В контексте рассматриваемого вопроса необходимо указать и на введение впервые Клаузиусом в научный оборот термина «энтропия» (от греческого слова τροπή — превращение) — понятия, ставшего в дальнейшем краеугольной составляющей теплотехнических наук.

Большое значение для формирования теории тепловых двигателей имело введение представления о коэффициенте полезного действия кругового процесса. Этот вопрос также восходит к изысканиям Карно. Как говорится в одном из комментариев к труду Карно, высказанная им теорема о максимуме движущей силы может быть сформулирована следующим образом: максимальный коэффициент полезного действия цикла с одним нагревателем и одним холодильником зависит только от температур этих резервуаров тепла и не зависит от вещества, с которым совершается цикл [6, с. 64].

Заметное место в работах Карно занимает установление взаимосвязи между механическими и тепловыми явлениями, их соотносительности и взаимопревращения, а также попытки определения величины механического эквивалента тепла. Это поисковое направление опирается на сложившуюся научно-производственную традицию исследований связи между затраченной теплотой и получаемой работой в паровой машине. Данный вопрос явился фактором, сыгравшим важнейшую роль в открытии Ю. Р. Майером, Дж. Джоулем и Г. Гельмгольцем закона сохранения превращения энергии и эмпирическом нахождении окончательной величины механического эквивалента тепла, равного 427 кгм.

И, наконец, необходимо указать на исследования Карно в области свойств газов и водяных паров. Им рассмотрены функциональные зависимости между теплоспособностью, удельным объемом, температурой, давлением и другими параметрами для различных физических тел и процессов изменения их состояния в значительных интервалах исследуемых величин. В этом вопросе Карно был предшественником плеяды исследователей, среди которых наиболее заметное место занимают французский ученый А. Реньо, опубликовавший три тома результатов проведенных им исследований свойств воды и водяного пара, и немецкий ученый Г. Цейнер. Последний дал систематическое изложение всей теории паров, составил таблицы их свойств, оснастил тексты своих работ обширным графическим и математическим аппаратом [8].

Массив исследований, начавшийся изысканиями Карно, являет собой монолитный конгломерат теоретических и эмпирических изысканий. Здесь довольно трудно локализовать и четко разграничить естественнонаучную и собственно теплотехническую сферы. Открытие закона сохранения и превращения энергии, определение величины механического эквивалента тепла, изыскания в области природы пара и разработка его теории — все это несомненно важнейшие составляющие естественнонаучного арсала. Но, вместе с тем, эти естественнонаучные направления частично или полностью были детерминированы потребностями теплотехнической практики; в определенной мере их развитие носило опытно-прикладной характер. Целевые исследовательские установки не имели строгой научно-познавательной направленности и в большинстве своем вытекали из проблем производства, достоянием которого и становились результаты изысканий.

Если между естественнонаучной и теплотехнической сферами все-таки в какой-то мере можно провести границу, то внутри самого теплотехнического направления для рассматриваемого периода этого сделать практически невозможно. Разработанные Карно и другими представления о разности тепловых уровней как источнике работы, о круговых процессах, о свойствах пара и т. д. представляли собой единый массив знаний, из которого в дальнейшем выкристаллизовывались различные теплотехнические дисциплины.

Для развития теории паровых двигателей значимость изысканий Карно заключается в следующем. Они раскрыли естественнонаучный смысл процессов, протекающих в теплотехнических установках. Эпоха опытно-рецептурной практики создания паровых двигателей и вытекавших отсюда частного характера и многочисленности конструктивных предписаний логически подходила к концу. Изыскания Карно открыли принципиальную возможность разработки как универсальной теории паровой машины, пригодной для любого типа установок, так и теории всякого иного, еще не созданного, теплотехнического устройства. И в этом плане можно говорить об опережении практики теорией.

В результате развития представления о термодинамических циклах наука о паровой машине переходит с опытно-практического уровня на абстрактно-теоретический, позволяющий описывать любой теплосиловой объект. Графическое изображение циклов представляет собой схематизацию рабочего процесса, протекающего в паровой машине. Формализованное перенесение теплофизической реальности на бумагу открывало принципиальную возможность для широких изысканий в области строения и функционирования паросиловых установок и обеспечения расчетно-проектировочной деятельности по конструированию тепловых двигателей с заданными техническими пара-

метрами. Но для ее практической реализации необходимо было разработать целостную теорию паровых машин, основу и костяк которой составляли бы уже проведенные исследования в области паровых циклов. Предпосылками для создания такой теории являлись: во-первых, работы многочисленных исследователей, главным образом Дж. Уатта и С. Карно; во-вторых, естественнонаучные достижения в сопредельных областях и, в-третьих, потребности интенсивно развивающегося теплосилового производства.

Вопрос о формировании целостной теории паровых двигателей обычно связывается с именем английского ученого и инженера У. Ренкина. Говоря о его вкладе в решение рассматриваемой проблемы, уместно выделить два уровня. В метанаучном плане на примере деятельности Ренкина можно говорить о механизме создания технической теории и производственно-опытного знания. Техническая теория в отличие от физической менее абстрактна, она имеет дело не с природой, а с реальным миром инженерии, главной задачей которого является описание и создание искусственных устройств*. Одним из условий формирования технической теории на основе синтеза эмпирического знания и физической теории (что имеет место в случае паровой машины), взаимного обмена информацией между сообществами ученых и инженеров является наличие посредников, т. е. «ученых–инженеров» и «инженеров–ученых», принадлежащих одновременно к обоим сообществам. Усилиями таких исследователей формируются основные звенья технической теории. Универсальным исследователем, соединившим в своем творчестве научную и практическую сферы, был, в частности, и Ренкин (подробнее см. [13])**.

Главным вкладом Ренкина в теплотехническую область является создание основ теории парового двигателя [14]. Он соединил в единое целое опыт конструирования установок, базирующийся на зависимостях между функционально–техническими и структурно–морфологическими характеристиками, эмпирически полученными Уаттом, Тредгольдом, Понселе и другими; теоретические разработки в области паровых циклов, восходящие к выполненным Карно исследованиям процессов, протекающих в двигателях, и, наконец, обширный комплекс знаний о свойствах воды и водяного пара.

При разработке теории Ренкин исходил из концепции идеального процесса в паровом двигателе. В основе представления о «цикле Ренкина» лежат следующие предположения. Для машин, работающих с насыщенным паром: 1) давление пара во время впуска остается постоянным; 2) в цилиндрах без паровой рубашки расширение пара происходит по адиабате; 3) в цилиндрах с паровой рубашкой количество передаваемого от нее тепла к расширяющемуся пару таково, что пар остается сухим и насыщенным, а давление пара во время впуска остается постоянным и равным давлению конца расширения; 4) объемом воды можно пренебречь по сравнению с объемом пара [4, с. 198].

Исчерпывающую оценку значения разработки Ренкиным вопроса о теоретически совершенном тепловом двигателе дал выдающийся русский ученый–теплотехник В. И. Гриневецкий: «Рассматривая работу паровой машины в совершенно отвлеченных условиях, он дал выражение для термического коэффициента машины, работающей без потерь и осуществляющей идеальный процесс... Этот процесс, под именем процесса Ренкина, принимается теперь за идеал, за мерило совершенства действительного рабочего процесса машины. Указание это очень важно: только с помощью ясной и определенной мерки, какую теория паровых машин имеет в процессе Ренкина, можно точно судить о качестве работы с термической стороны действительной паровой машины, о недочетах в ее работе и их размерах» [15, с. 47].

Изыскания Ренкина предопределили развитие теории действительной паровой машины. Становление теории приходится на 1860–1880 гг. и связано с именами таких инженеров и ученых, как Вилланс, Гирн, Ишервуд, Кирш, Кларк, Надал, Никольсон и Цейнер. Завершение формирования теории относится к концу XIX — началу XX вв.

* Подробнее о сходствах и различиях физических и технических теорий см., например, [9–12].

** Отметим, что принадлежность одновременно к естественнонаучной и производственной областям характерна для Уатта, Карно и других «инженеров–ученых», стоявших у истоков теплотехнических наук.

3. Термодинамические циклы и развитие тепловых электростанций

Наиболее глубоко и всесторонне производственно-прикладные аспекты термодинамических разработок С. Карно проявились в теории тепловых электростанций (ТЭС). Зародившаяся на рубеже XIX и XX столетий эта теория на сегодня является одной из важнейших областей технического знания и современной инженерно-проектировочной деятельности. Для того, чтобы исследовать обстоятельства и механизм формирования теории ТЭС, необходимо прежде всего проанализировать социально-производственные и научно-технические предпосылки генезиса и развития тепловых электростанций.

Характернейшей чертой машинно-фабричного производства XIX в. является концентрация промышленности. Укрупнение производственных мощностей фабрик и заводов предполагало и соответствующий рост их энергетического потенциала. Увеличивались как численность действующих теплосиловых установок, так и их единичные мощности. Этот процесс, однако, с экономической точки зрения не был вполне благоприятным, поскольку темпы роста затрат, связанных с добычей топлива и его транспортировкой к потребителям, опережали темпы роста производимой промышленной продукции и снижения ее себестоимости.

С увеличением размера промышленных установок, ростом их единичных мощностей и показателей интенсивности действия все более обострялась проблема механической передачи и распределения энергии. Разрабатывались и создавались зубчатые, цепные, фрикционные, канатные, ременные и другие передачи. Совершенствовались конструкции муфт, валов, подшипников. Тем не менее, доля энергетических потерь в трансмиссионных схемах была велика и КПД передачи энергии зачастую опускался ниже 50%.

Резкое увеличение затрат на добычу и транспортировку топлива и недопустимо низкая эффективность механической передачи энергии в виде трансмиссионных систем предопределили формирование социального заказа на новую энергетическую базу производства. Возможность удовлетворения возникшей потребности определялась существовавшими знаниями об электрической энергии, изобретением способа передачи ее на расстояния, разработкой и созданием трансформаторов и асинхронных двигателей. Применение промежуточного энергоносителя, генерируемого за счет затраты тепловой энергии и доставляемого с помощью линий электропередач и электроприводов к его фабрично-заводским потребителям, представляло собой решение возникшей в результате концентрации производства проблемы транспортировки и распределения энергии. Сложившаяся ситуация предопределила строительство новых тепловых электростанций; одновременно с этим встал вопрос о целесообразности и, в конечном счете, возможности использования паровой машины в качестве двигателя электрогенераторов.

С созданием и внедрением на ТЭС быстроходных электрогенераторов возникла проблема передачи к ним вращательного движения от тихоходных паровых машин. Все известные формы трансмиссионных систем не давали технически надежного и экономически эффективного решения вопроса. Единственным доступным способом было увеличение числа оборотов первичного двигателя до скорости вращения электрогенератора. Паровая машина в силу ее конструктивно-технологической сущности обеспечить этого не могла. Кроме того, со стороны электрогенераторов к первичному двигателю были предъявлены требования высокой равномерности вращательного движения и возможности дальнейшего увеличения мощности. Это привело к развитию турбины и вытеснению ею паровой машины на ТЭС (см. [16, с. 286–298]).

Социально-производственная потребность в развитии новой энергетической базы промышленности вызвала к жизни интенсивное строительство тепловых электростанций. Возведение первых ТЭС относится к периоду 1880-х гг. Вводятся в эксплуатацию станции в Филадельфии, Париже, Честерфильде, других городах Европы и Америки. Одновременно строятся ТЭС в Петербурге и Москве. Все это были так называемые блок-станции постоянного тока, обеспечивавшие электроэнергией очень ограниченное число потребителей.

Вскоре начинают сооружаться центральные электростанции для обеспечения электроэнергией значительно большего числа потребителей. Теоретическим обоснованием к их строительству послужила концепция централизованного производства электроэнергии как наиболее эффективного с экономической и с научно-технической точек зрения. Первая такая станция мощностью 500 кВт была сооружена в 1882 г. в Нью-Йорке [17, с. 345]. Спустя четыре года в Петербурге возводятся две аналогичные ТЭС, суммарная мощность которых составляла около 400 кВт. В 1888 г. вводится в эксплуатацию первая центральная электростанция в Москве мощностью 403 кВт [18, с. 71].

ТЭС постоянного тока обладали ограниченным ресурсом электроснабжения. Именно это предопределило переход к системе переменного тока, позволявшей значительно увеличить дальность передачи электроэнергии. В 1884 г. в Лондоне сооружается первая электростанция подобного рода. Спустя несколько лет в предместье Лондона, в Дептфорде, строится более крупная ТЭС мощностью 3000 кВт. Одновременно первые электростанции переменного тока возводятся в России. Крупнейшей из них была станция, сооруженная в 1894 г. инженером Н. В. Смирновым на Васильевском острове в Петербурге [18, с. 72].

Следующим этапом в развитии ТЭС был переход к технике трехфазного тока. Первые трехфазную систему опробовали в 1891 г. в Германии, когда состоялась опытная передача электроэнергии из местечка Лауфен во Франкфурт-на-Майне по экспериментальной ЛЭП протяженностью 170 км. Лауфен-франкфуртский эксперимент положил начало интенсивному развитию электростанций трехфазного тока. Только в одной Германии за период с 1893 по 1908 гг. их число возросло с 20 до 130 [17, с. 443]. В конце XIX в. к строительству электростанций трехфазного тока приступают и в крупнейших городах России — Москве, Петербурге, Харькове, Самаре, Киеве, Риге, Одессе.

Интенсивное развитие теплотехнического производства вызвало к жизни целый комплекс инженерно-проектных и конструкторских проблем в области строительства и эксплуатации ТЭС. Объективно возникла потребность в становлении системы технических знаний, описывающей их структуры и функционирование. Возможность формирования новой технической дисциплины определялась обширными знаниями о тепле, накопленными за многие десятилетия в процессе проведения фундаментальных и инженерно-прикладных исследований.

Исследования таких крупнейших ученых XIX в., как Карно, Клапейрон, Клаузиус, Майер, Джоуль, Ренкин и др., предопределили, в основном, завершение формирования в последней трети XIX столетия системы знаний, определяемой дисциплинарными рамками термодинамики. Ее тематический диапазон чрезвычайно широк и простирается от закона сохранения и превращения энергии и кинетической теории газов до расчетного инструментария, используемого при выполнении различных проектно-конструкторских процедур.

Говоря о фундаментальном теплотехническом знании, необходимо назвать первый и второй законы термодинамики, такие понятия, как идеальный и реальный газы, их параметры (давление, удельный объем, температура, теплоемкость) и единицы измерения, равновесное состояние, обратимый и необратимый процессы, внутренняя энергия и др. В процессе теоретического и экспериментального изучения были выработаны физические представления об изохорическом, изобарическом, изотермическом, адиабатическом и политропическом процессах изменения состояния рабочего тела. Эти процессы получили всестороннее графическое и математическое описание.

По мере развития термодинамических знаний они приобретали все более отчетливо выраженную производственно-прикладную ориентацию. Речь идет об экспериментальных изысканиях и теоретических обобщениях свойств водяного пара, влажного воздуха и газов, изучении процессов парообразования, изменения состояния водяного пара, истечения и дросселирования газов и паров.

Особое значение в развитии прикладных теплотехнических дисциплин, а следовательно и теории тепловых электростанций, имели сформировавшиеся в рамках термодинамики вспомогательные инженерно-проектировочные средства — расчетно-понятийный и графо-аналитический аппарат. Здесь прежде всего необходимо указать

на такие параметры состояния рабочего тела как энтальпия и энтропия, диаграммы $T-S$ и $I-S$ для водяного пара, а также термодинамические таблицы для воды и водяного пара. Наконец, ко времени возникновения потребности в теории тепловых электростанций уже получило развитие теоретическое описание циклов различных тепловых двигателей и установок, в том числе и паровых машин. Таким образом, к моменту начала формирования отдельных сюжетов в области теории ТЭС имелась обширная система фундаментальных и прикладных знаний, определяемых дисциплинарным пространством термодинамики. У истоков этих знаний стоял С. Карно. Начатые им изыскания в области термодинамических законов и циклов сделали принципиально возможным зарождение и формирование теории тепловых электростанций.

В настоящее время теория тепловых электростанций представляет собой комплексную, многообъектную теплотехническую дисциплину, решающую вопросы проектирования, строительства и эксплуатации ТЭС. В ней исследуются генеральный план электростанции и тип компоновки главного здания, рассматривается основное и вспомогательное оборудование, анализируются производственные установки и сооружения станции (техническое водоснабжение, топливное хозяйство, очистка дымовых газов, золоудаление и т. д.), рассчитываются технико-экономические показатели предприятия.

Через все эти проблемы единым связующим стержнем проходит вопрос о проектировании и расчете тепловой схемы ТЭС. Другими словами, теорию ТЭС можно представить как метадисциплину, состоящую из ряда автономных дисциплин, каждая из которых замыкается на соединяющую их теорию тепловой схемы ТЭС. Такая соотнесенность участков инженерно-технического знания в общих чертах была характерна и для периода зарождения и формирования теории ТЭС. В связи с этим представляется целесообразным в дальнейшем сосредоточить внимание на анализе генезиса и развития теории тепловых схем ТЭС.

Тепловая схема ТЭС представляет собой структурно-символическое изображение отдельных технических средств, замкнутый контур совокупности которых является конструктивным воплощением термодинамического цикла*. Технологически он реализуется в протекающем на ТЭС поочередном агрегатном образовании паро-водяного агента и трансформации за счет этого подведенной энергии тепла в механическую энергию. Проектирование схемы в принципиальном плане восходит к уравнению теплового баланса и представлениям о круговых термодинамических процессах, которые применительно к теории ТЭС приобретают наиболее развернутое, завершенное толкование и инженерное приложение.

Проектирование тепловой схемы — это практическое использование формализованного перенесения теплофизической реальности на бумагу в виде графической фиксации термодинамического цикла и морфологической структуры схемы, которые символизируют собой рабочий процесс, протекающий на ТЭС. В качестве метода реализации такой процедуры выступает конструктивно-тепловой расчет схемы, характеризующей сущность технологии преобразования и использования энергии рабочего тела станции.

Говоря о генезисе теории тепловых схем, необходимо подчеркнуть, что уже первые опыты по их проектированию проводились в условиях наличия обширной научно-теоретической и инженерно-расчетной базы. Ее основу составляли знания о циклах паросиловых установок и методы их анализа.

Оставляя в стороне вопрос о хронике отдельных изысканий и их авторстве, рассмотрим главные узлы этих знаний. Основным здесь, несомненно, является структурно-функциональное изображение паросиловой установки, обеспечивающей протекание термодинамического цикла (рис. 2). Сущность изображения в технологическом плане сводится к следующему. В парогенераторе (С) осуществляется нагрев воды и ее превра-

* В расширительном плане под тепловой схемой понимается и ее стационарное воплощение в виде всего основного и вспомогательного оборудования, объединенного сложной коммуникационной системой трубопроводов с паром и водой.

шение в пар. Сухой насыщенный или слегка влажный пар при давлении, намного превышающем атмосферное, поступает в пароперегреватель (D), где он досушивается и перегревается. Из пароперегревателя пар подается в двигатель (E), функции которого на ранних этапах выполняла паровая машина. Позже она постепенно была вытеснена турбиной. В двигателе пар расширяется, его тепловая энергия преобразуется в механическую. С точки зрения эффективности рабочего процесса расширение пара целесообразно доводить до наинизшего практически возможного давления. С этой целью к выходной части двигателя присоединяют конденсатор (F), где пар, конденсируясь, переходит в жидкое состояние. Фазовое превращение рабочего тела в конденсаторе сопровождается переходом скрытой теплоты парообразования к циркулирующей охлаждающей воде. Полученный из пара конденсат насосом (B) подается в парогенератор и цикл повторяется вновь. Такова физикотехническая сущность термодинамического цикла паросиловой установки. Его структурно-графическая интерпретация (рис. 2) стала к началу XX в. общепринятой в инженерно-научной среде при создании теплосиловых объектов и получила широкое распространение в технической литературе.

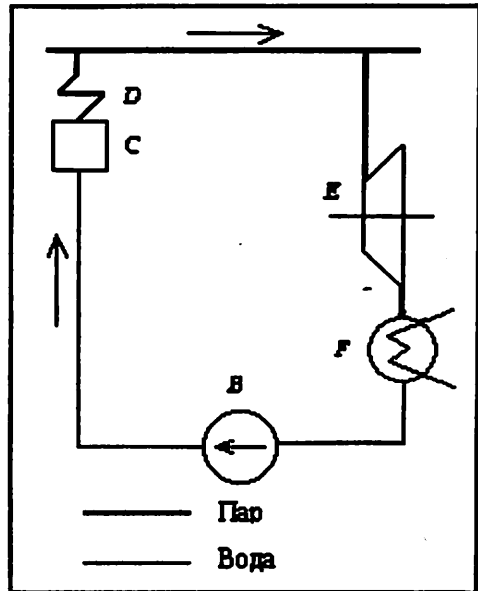


Рис. 2. Схема паросиловой установки в условных обозначениях

Другой базовой наработкой, лежащей в основе теории тепловых схем, является T - S диаграмма с экспликацией идеального (так называемого «цикла Ренкина») и реального процессов изменения состояния рабочего тела в теплосиловой установке (рис. 3).

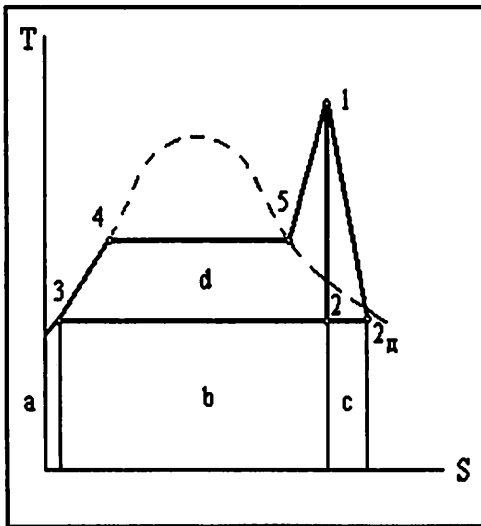


Рис. 3. Изображение цикла паросиловой установки в T - S диаграмме при наличии трения

Термодинамическая сущность диаграммной экспозиции заключается в следующем. Точка 3 характеризует параметрическое состояние конденсата, при котором он поступает в парогенератор. Нагрев воды происходит при постоянном давлении и изображается изобарой 3-4. Точка 4 соответствует состоянию воды в котле при температуре кипения. Прямая 4-5 изображает процесс парообразования при постоянной температуре, а изобара 5-1 — перегрев пара при постоянном давлении. Вышедший из котельного агрегата пар адиабатически расширяется в двигателе. Этот этап термодинамического цикла представлен прямой 1-2. Точка 2 соответствует завершению протекающей изотермической конденсации пара; в этой же точке заканчивается и возобновляется вновь рабочий процесс установки. Линия 1-2 отражает идеальный цикл, характеризующийся обратимостью. Действительный процесс расширения пара, учитывающий потери от трения, является необратимым и представлен прямой 1-2д.

Согласно термодинамической теории площади, ограниченные координатными осями и линиями рабочего процесса, изображают работу или теплоту (при переводе одного в другое учитывается термический эквивалент работы). Подведенное тепло соответствует площади $d+b$, полезно преобразованное — площади d ; в случае действительного процесса последнее уменьшается на величину c и может быть представлено разностью площадей $d-c$.

Третьей основной детерминантой развития теории тепловых схем является $I-S$ диаграмма — универсальное и простое средство для проведения расчетных и графо-аналитических операций (рис. 4). С помощью этой диаграммы эксплицируется рабочий процесс пара в двигателе. В системе двумерных координат, где по оси абсцисс отложена энтропия, а по оси ординат — энтальпия, адиабатическое расширение представлено линией 1-2 для обратимого идеального цикла и линией 1-2д для действительного процесса.

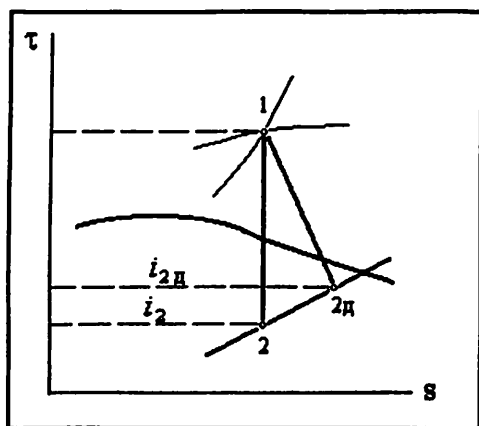


Рис. 4. Изображение процесса действительного расширения в $I-S$ диаграмме

Структурно-графическая интерпретация термодинамического цикла, а также $T-S$ и $I-S$ диаграммы стали широко использоваться научно-инженерным сообществом уже на первых этапах конструирования и проектирования тепловых схем. Здесь необходимо отметить, что создание этого инструментария не было следствием объективно сложившейся потребности в становлении теории ТЭС. Выделенные выше узлы знаний сформировались в контексте общего развития термодинамики. Это развитие носило характер единого научного потока, простирающегося от фундаментальных абстракций до прикладных наработок. Его дисциплинарное членение находилось в начальной стадии. Массив термодинамических знаний представлял собой как бы научный резервуар, откуда черпались концептуальные построения и утилитарная атрибутика для реше-

ния расчетно-проектировочных и производственных проблем. Возможность разрастания указанных выше базовых построений в целостную ткань рождавшейся теории определялась сложившимся аппаратом описания паросиловых установок. Речь идет о теплотехнической символике, математизации физических процессов, графо-аналитических и расчетных методах, а также таком специфическом инженерно-проектировочном инструменте, как термодинамические таблицы воды и водяного пара. Таков в общих чертах механизм генезиса теории тепловых схем. Вопросы ее зарождения связаны с именами большой группы представителей русской и зарубежных теплотехнической школ, — У. Ренкина, Г. Цейнера, А. А. Брандта, И. А. Вышеградского, А. В. Гадolina, Ф. Е. Орлова, Ф. Ф. Петрушевского [14, 8, 19–23].

Формировавшийся механизм описания тепловых схем позволял уже на ранних этапах анализировать проблемы, составившие в дальнейшем костяк всей теории. Обычно по заданным характеристикам оборудования, а также параметрам свежего и отработанного в двигателе пара определялась потребность парогенератора в питательной воде и необходимое для ее превращения в пар количество подведенного тепла. В принципиальном плане основу всех расчетов составляли уравнения теплового баланса. Возможно было решение и обратной задачи — оценка производительности основного оборудования (котлов и двигателей) через тепловые затраты. Важнейшей проблемой являлась экспертиза экономичности проектируемой установки. Основу расчетно-понятийного аппарата проводившихся изысканий составляли такие дефиниции, как термический, относительный и внутренний КПД, адиабатическое или предполагаемое теплопадение, параметры свежего и отработанного пара, удельный и полный расход пара двигателями и их мощностные характеристики, количество тепла, подведенного к парогенератору.

Расчетно-инженерные изыскания в области тепловых схем сводились в конечном счете к определению их оптимальной эффективности и выбору основного и вспомогательного оборудования. Возможность решения проблемы получения максимальных показателей КПД ТЭС определялась как состоянием энергомашиностроительной индустрии, так и уровнем теоретических наработок в рассматриваемой области. Инженерно-прикладные исследования показали, что путь к повышению экономичности паросиловых циклов ТЭС лежит прежде всего через увеличение мощностей оборудования и рост начальных параметров пара. Однако оба фактора увеличения эффективности ограничивались затратно-стоимостными, прочностными и материаловедческими проблемами. За период с конца XIX до 20-х гг. XX в. единичные мощности турбоагрегатов возросли с нескольких сот до трех, пяти и более тысяч кВт, а начальные параметры пара достигли 1,3–1,6 МПа и 300–350°C. Удельный расход топлива на выработанный кВт-час электроэнергии как один из главных показателей эффективности ТЭС составлял значительную величину и находился на уровне 1,3–1,5 кг/кВт-час [18, с. 74].

Интенсивные исследовательские поиски путей повышения эффективности ТЭС в конце концов привели к качественно новым инженерным решениям в теплоэнергетическом производстве. Основу этих решений составила идея использования тепла для подогрева конденсата, питающего котлы. Рабочий процесс получил название регенеративного процесса, а соответствующий термодинамический цикл — регенеративного цикла. Приоритет в разработке и внедрении в практику идеи регенеративного цикла принадлежит отечественным ученым Г. И. Петелину, Я. М. Рубинштейну и Б. М. Якубу.

В принципиальном плане регенеративный процесс состоит в следующем: часть пара, проработавшего в паровой турбине, отводится из одной или нескольких ее ступеней и идет на нагревание конденсата турбины. В этом случае потеря тепла в холодном источнике (конденсаторе турбины), по сравнению с чисто конденсационным циклом, сокращается, и, несмотря на неполное использование работоспособности пара в турбине и увеличение удельного расхода рабочего вещества, достигается более высокая тепловая экономичность и КПД цикла.

Отдельные эксперименты, близкие в той или иной степени к идеям регенерации, проводились еще за несколько десятилетий до того, как началось практическое освоение регенеративных принципов. В 1876 г. Веер, а в 1889 г. Норманд применили для подогрева питательной воды пар, который уже частично произвел работу. В 1906 г. Ферранти впервые осуществил установку с многократным подогревом питательной воды [24, с. 7].

Однако только в начале 1920-х гг., главным образом в 1923–1924 гг., регенеративный процесс был реализован на действующих ТЭС, после чего получил широкое распространение.

В СССР регенеративный подогрев питательной воды впервые был применен на Шатурской ГРЭС и ТЭС «Красный Октябрь». Чуть позже — на Дубровской, Зуевской и Бобриковской станциях [25, с. 17]. В 1930 г. Ленинградским металлическим заводом была выпущена первая серийная конденсационная турбина мощностью 25 МВт на давление 2,6 МПа и температуру 375°C, конструктивное выполнение которой предусматривало отборы пара для регенеративного подогрева питательной воды [25, с. 17]. Для тепловых схем отечественных ТЭС периода 1920–1930 гг. характерна слаборазвитая система регенерации. Как правило, турбины имели не более трех отборов пара, а по тракту питательной воды было соответственно расположено по три подогревателя (рис. 5). Уровень развития тепловых схем зарубежных станций был несколько выше. Так, в 1929 г. на американских ТЭС «Холланд» и «Стейт лайн» были введены в эксплуатацию турбогенераторы с пятью отборами пара, такое же количество отборов содержал и агрегат, пущенный в 1930 г. на станции «Сауф Эмби» [24, с. 298]. Широкому внедрению регенерации способствовало зарождение и развитие в 1920-е гг. теплофикации, предусматривавшей использование отбираемого из турбины пара для нужд промышленных и коммунальных потребителей.

Усложнение тепловых схем, связанное с появлением нескольких подогревателей по тракту питательной воды, обусловило и соответствующее развитие инженерно-

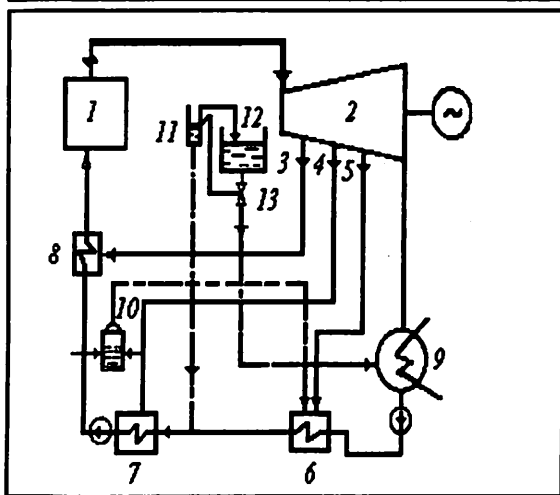


Рис. 5. Схема конденсационной электростанции среднего давления с открытым питательным баком

Условные обозначения:

1 — парогенератор; 2 — турбогенератор; 3-5 — нерегулируемые отборы пара; 6-8 — поверхностные подогреватели питательной воды; 9 — конденсатор; 10 — испарительная установка; 11 — регулирующий бачок; 12 — питательный бак; 13 — задвижка

подогревателей. Анализ обычно начинают с установок по отпуску тепла, так называемых внешних узлов, далее рассчитываются подогреватели высокого давления, затем деаэраторы и, наконец, регенеративные подогреватели низкого давления, т. е. составление тепловых балансов по тракту питательной воды ведется от парогенератора к конденсатору. Следующий этап расчета заключается в установлении расхода пара на турбину или электрической мощности турбогенератора по его энергетическому уравнению. После этого определяются численные величины потоков пара и воды. Заключительный этап анализа сводится к расчету показателей экономичности как ТЭС в целом, так и отдельных ее агрегатов.

Изложенная методика ориентирована на абстрактно-идеализированные модели тепловой схемы. Такая рецептура являет собой средство для описания принципиально любого паросилового цикла ТЭС. Здесь не учитывается индивидуальная специфика теплоэнергетического объекта. При проектировании определенной теплоэлектростанции расчеты ведутся уже с учетом местных особенностей: топливно-транспортной инфраструктуры, природно-климатических условий, сетевой карты потребителей и графика нагрузок и т. д.

Основные контуры приведенной исследовательско-проектировочной процедуры складывались, главным образом, в первые десятилетия XX в. вплоть до 1940-х гг. При неизменности базовых узлов анализа его отдельные сюжеты развивались и в последующие периоды. Обусловлено это было новыми инженерно-техническими решениями: промежуточным перегревом пара и повышением его начальных параметров, увеличением числа регенеративных отборов (современные тепловые схемы ТЭС имеют до 8-9 отборов), ростом мощностных характеристик основного и вспомогательного оборудования и связанным с этим усложнением его конструктивных решений. Говоря о содержательной эволюции расчетных методик, необходимо отметить, что одновременно изменялась буквенно-математическая символика различных физико-энергетических величин (мощностные характеристики, параметрические оценки рабочего тела и др.).

аналитических приемов исследования. Постоянно совершенствовавшаяся методика расчета тепловых схем в самом общем виде может быть представлена следующим образом. Исходными величинами, как правило, являются электрическая мощность турбоагрегата и тепловая нагрузка. Иногда заданной величиной выступает расход свежего пара на турбину, и в этом случае мощность двигателя становится уже искомым параметром. Расчет схемы сводится к определению потоков пара и воды, уточнению предварительно выбранных параметров и определению показателей экономичности ТЭС и отдельных ее установок [26, с. 155]. Анализ начинается с построения рабочего процесса пара в турбине в $I-S$ диаграмме и определения параметров пара и воды. Далее составляются уравнения материального баланса, раскрывающие соотношение между потоками пара, питательной и добавочной воды. Главный этап расчета — составление и решение уравнений теплового баланса различных

Эволюционировала и теплотехническая терминология. Понятие «теплосодержание» постепенно трансформировалось в дефиницию «энтальпия», на смену определения «теплосиловые» пришло определение «тепловые», вместо выражения «отъемный пар» стали употреблять «отбираемый пар» и т. д.

Важнейшую роль в становлении теории тепловых схем играли научно-прикладные изыскания, представляющие собой как бы объемный каркас систематизированных эмпирических данных, базирующихся на фундаментальных положениях термодинамической теории. Механизм формировавшегося таким образом пограничного массива знаний в наибольшей степени проявился в период зарождения и развития идей регенерации.

Экономическая целесообразность выработки электроэнергии за счет той части пара, которая не поступает в конденсатор, а отбирается для подогрева питательной воды, выдвинула проблему нахождения наиболее эффективных параметров регенеративного отбора. Чем выше давление отбора, тем выше и температура питательной воды. Однако это еще не гарантирует экономического выигрыша, хотя повышение температуры подогрева воды само по себе выгодно термодинамически, так как ведет к снижению тепловых затрат в парогенераторе. Дело в том, что при повышении температуры и давления отбираемого пара уменьшается количество электроэнергии, выработанное на тепловом потреблении. Если же снизить параметры отбора, т. е. увеличить теплоперепад пара, идущего на регенерацию, то из-за снижения температурного потенциала отбираемого пара уменьшится подогрев питательной воды.

Эти выводы были получены Г. И. Петелиным, Я. М. Рубинштейном и другими отечественными исследователями в результате как термодинамических расчетов тепловой схемы с различными вариантами параметров отборов, так и чисто экспериментальным путем [24, 27]. Инженерная мысль утвердилась в том, что существуют некоторые оптимальные параметры отбираемого пара и сопряженная с ними температура подогрева питательной воды, обеспечивающие наибольшую эффективность проекторочного решения. Расчетными и экспериментальными методами была выведена графическая зависимость КПД выработки электроэнергии на тепловом потреблении от давления и температуры отбора. Кривая имела вид параболы с максимумом посередине интервала между температурами насыщения в парогенераторе и конденсаторе (рис. 6).

Исходя из установленного постулата о том, что задача правильного выбора системы регенерации сводится к получению максимального количества электроэнергии на тепловом потреблении и что «чем больше доля необходимой электрической энергии вырабатывается на тепловом потреблении, тем выше КПД выработки электрической энергии для всей установки» [28, с. 155], Г. И. Петелин, Я. М. Рубинштейн и др. пришли к выводу, что путь к реализации сформулированного положения лежит через увеличение числа отборов пара. Расчетно-экспериментальные исследования этого вопроса завершились построением кривых изменения КПД выработки электроэнергии при различном количестве отборов. Анализ графиков показывает, что с увеличением числа от-

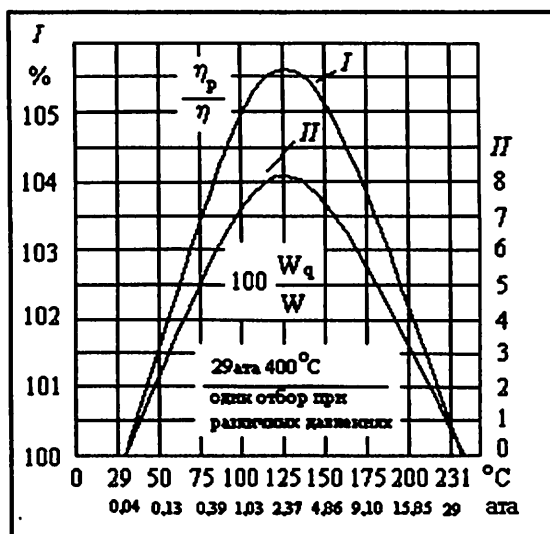


Рис. 6. Изменение КПД выработки электрической энергии и доли электрической энергии, вырабатываемой на тепловом потреблении, в зависимости от числа отборов для регенерации

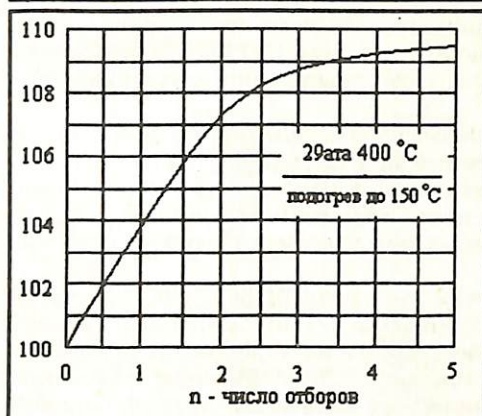


Рис. 7. Изменение КПД выработки электрической энергии в зависимости от числа отборов для регенерации

боров растет КПД выработки электроэнергии, однако при этом каждый следующий отбор пара дает все меньшее приращение показателя эффективности (рис. 7).

Следующим шагом в получении вспомогательных для проектирования расчетно-графических материалов было изучение влияния роста параметров свежего пара и температуры подогрева питательной воды при постоянном и переменном количестве отборов на увеличение эффективности регенерации, а следовательно, и самой ТЭС. Полученные расчетным и экспериментальным путями графические зависимости постулировали прямо пропорциональную связь между ростом КПД и параметрами рабочего тела.

Выведенные в процессе инженерно-прикладных изысканий графические и математические зависимости стали важнейшими расчетно-проектировочными средствами при разработке тепловых схем. По заданным исходным величинам можно было оценить или принять с последующей корректировкой температуру подогрева питательной воды, число отборов и их разбивку по ступеням турбины, КПД в зависимости от структуры регенеративной системы и параметров отбираемого пара и т. д.

Основной корпус расчетного инструментария, соединившего в себе фундаментальные сюжеты с эмпирическим знанием, сформировался в период 1920–1940-х гг. Помимо названных приемов был разработан значительный ряд других графо-аналитических средств, представлявших в совокупности целостную систему проектировочных методик. Здесь необходимо выделить такие вопросы, как влияние относительного внутреннего КПД турбины на оптимальное распределение отборов, определение наивыгоднейшей структуры подогрева питательной воды для схем с разнотипным включением подогревателей, изменение шкалы давлений отборов при одновременном подогреве как расширяющимся в турбине паром, так и каким-то внешним теплоносителем, оценка коэффициента недовыработки энергии при различных вариантах проектировочных решений тепловых схем и др. (подробнее см. [24]). Говоря о таком расчетном средстве как термодинамические таблицы воды и водяного пара, необходимо отметить, что в период зарождения регенеративного подогрева наибольшее распространение имели таблицы Молье. В дальнейшем на смену им постепенно приходят таблицы М. П. Вукаловича [29].

В процессе развития расчетных процедур в особую группу выделились многочисленные физико-технические характеристики, содержание и величина которых имеют абсолютно эмпирическое происхождение. При проектировании тепловых схем ими задаются, исходя из практического опыта конструирования и эксплуатации ТЭС. Речь идет о таких характеристиках, как внутренний относительный КПД отсеков турбины, потери давления в паропроводах и пароохладителях, недогрев питательной воды в подогревателях, величины утечек питательной воды и пара, коэффициенты механических и тепловых потерь в основном и вспомогательном оборудовании, расходы пара на эжекторы уплотнения турбин и калориферы котлов и многое другое. Как правило, величины названных подобных им характеристик определяются с помощью технических справочников, отчетов НИИ и КБ, документации заводов-изготовителей и т. д. (см., например, [30–32]).

Изложенное показывает, что развитие теории тепловых схем можно разбить во времени на два качественно отличительных периода. Первый период до середины 1920-х гг. характеризуется преимущественным осмыслением и использованием уже наработанных в термодинамике фундаментальных знаний (представление о паросило-

вом цикле, его графическая интерпретация, математическое описание физических процессов и т. д.). На этом этапе разработка расчетно-графического аппарата, базирующаяся на опыте проектирования и эксплуатации ТЭС, имеет ограниченное значение и не занимает главенствующего места в дисциплинарном массиве знаний. Такая ситуация объясняется отсутствием разнообразия конструктивных решений тепловых схем.

Начало отсчета второго периода связано с зарождением регенеративного подогрева питательной воды. В это время возрастает роль как расчетно-проектировочных методик (графики, диаграммы, типологические таблицы и т. д.), так и выработанного исключительно опытным путем массива конкретных технических показателей.

Таким образом, на втором этапе теория тепловых схем может быть представлена как иерархическая триада знаний, имеющая фундаментально-теоретический, расчетно-графический и чисто эмпирический уровни. При этом если концептуальные построения высшего уровня были уже наработаны и их надо было только осмыслить и воспринять, то структуры среднего и низшего уровней рождались под влиянием опережавших потребностей практики — развития регенеративного подогрева питательной воды.

Дисциплинарный каркас теории тепловых схем сложился в период 1920–1940-х гг. Однако и в дальнейшем массив знаний расширялся и углублялся. Динамика типологии расчетных методик обуславливалась развитием видов тепловых схем. Алгоритм проектирования определялся технологическим профилем станции (конденсационные, теплофикационные, смешанные и т. д.). Окончательно теория тепловых схем сложилась на рубеже 1950–1960-х гг.; в дальнейшем расчетные модификации имели место лишь на уровне проводимых в НИИ и КБ проектных разработок конкретных ТЭС.

Таким образом, необходимым условием становления и развития теории тепловых установок являлось наличие системы естественнонаучных знаний; важнейшее место в этой системе принадлежит термодинамике. Термодинамические законы и циклы неотделимы от имени С. Карно. В этом главное и непреходящее значение его научно-инженерного наследия.

Список литературы

1. Конфедератов И. Я. История теплотехники. М.-Л., 1954.
2. Конфедератов И. Я. Иван Иванович Ползунов. М.-Л., 1951.
3. Конфедератов И. Я. Джемс Уатт. М., 1969.
4. Радциг А. А. История теплотехники. М.-Л., 1936.
5. Иванов Б. И., Чешев В. В. Становление и развитие технических наук. Л., 1977.
6. Карно С. Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу // Второе начало термодинамики. М.-Л., 1934.
7. Клаузиус Р. Механическая теория тепла // Второе начало термодинамики. М.-Л., 1934. С. 71–158.
8. Zeuner G. Grundzuge der mechanischen Warmetheorie. Lpz., 1886.
9. Layton E. T. American Ideologies of Science and Engineering // Technology and Culture. 1976. Vol. 17. № 4. P. 682–696.
10. Bryant L. The development of the Diesel Engine // Technology and Culture. 1976. Vol. 17. № 3. P. 432–446.
11. Bryant L. The role of thermodynamics in the evolution of heat engines // Technology and Culture. 1973. Vol. 14. № 2. P. 152–165.
12. Cardmell D. S. L., Hills R. Thermodynamics and Practical engineering in the nineteenth century // History of technology. 1976. Vol. 1. № 1. P. 1–20.
13. Chanduall D. F. The Harmony of Theory and Practice: The engineering science of W. G. M. Rankine // Technology and Culture. 1982. Vol. 23. № 1. P. 32–49.
14. Rankine W. Manual of the Steam Engine. L., 1897.
15. Гриневецкий В. И. Теория паровых машин. М., 1906.

16. *Craft T.* Central Station. N-Y.; L., 1917.
17. *Белькинд Л. Д., Веселовский О. Н., Конфедератов И. Я., Шнейберг Я. А.* История энергетической техники. М.-Л., 1960.
18. История энергетической техники СССР. Т. 1. Теплотехника. М.-Л., 1957.
19. *Брандт А. А.* Основания термодинамики в приложении к паровым машинам. СПб., 1893.
20. *Вышнеградский И. А.* Механическая теория теплоты. СПб., 1896.
21. *Гадолин А. В.* Курс механической теории тепла. СПб., 1871.
22. *Орлов Ф. Е.* Термодинамика. СПб., 1868.
23. *Петрушевский Ф. Ф.* Специальный курс теплоты. СПб., 1871.
24. *Петелин Г. И.* Регенеративный подогрев питательной воды. М.-Л., 1932.
25. *Гвоздецкий В. Л.* Пути развития советской теплоэнергетики. М., 1980.
26. *Рыжский В. Я.* Тепловые электрические станции. М.-Л., 1967.
27. *Рубинштейн Я. М.* Регенеративный подогрев питательной воды. М., 1929 г. № 44, 62.
28. *Якуб Б. М.* Тепловые электрические станции. М.-Л., 1938.
29. *Вукалович М. П.* Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. М., 1963.
30. Справочник по паровым турбинам. М., 1962.
31. Теплотехнический справочник. Т. 1. М., 1956.
32. *Шляхин П. Н., Бершадский М. Л.* Краткий справочник по паротурбинным установкам. М., 1970.

Материалы к биографиям ученых и инженеров

А. Т. ГРИГОРЬЯН, В. С. КИРСАНОВ

К 150-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ НИКОЛАЯ ЕГОРОВИЧА ЖУКОВСКОГО

От редакции



Ашот Тигранович Григорьян

Когда этот выпуск *ВИЕТ* готовился к печати, мы получили скорбное известие о скоропостижной кончине 14 июня 1997 г. Ашота Тиграновича Григорьяна (1910–1997), главного научного сотрудника Института истории естествознания и техники РАН, действительного члена Международной академии истории науки, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, доктора физико-математических наук, профессора.

С именем А. Т. Григорьяна связана целая эпоха в жизни Института истории естествознания и техники, в развитии истории науки в нашей стране и за ее пределами. Он автор 12 монографий и более чем 300 статей, опубликованных у нас и за рубежом. А. Т. Григорьян был избран в руководящий состав Международного союза истории и философии науки, где он занимал различные должности вплоть до президента Союза. На протяжении 30 лет он участвовал в работе большинства международных конгрессов по истории науки и, в частности, был одним из организаторов XIII (Московского) международного конгресса.

Жуковский давно стал одним из символов достижений русской науки. Существует множество работ, в которых профессионально разобраны его труды, однако для истории науки он все еще остается своеобразным белым пятном, поскольку ни сложные обстоятельства его жизни, ни тонкие методы решения им сложнейших проблем не нашли пока адекватного описания. В этом смысле жизнь и творчество Жуковского представляют для историка благодарное поле деятельности. Настоящая статья не претендует на решение этой задачи, цель авторов гораздо скромнее — напомнить о замечательном ученом и прекрасном человеке в год его 150-летнего юбилея.

Жуковский родился в небогатой дворянской семье, отличавшейся строгими патриархальными традициями. По словам Николая Егоровича, род его с отцовской стороны восходил к митрополиту Филиппу, погибшему, как известно, во времена Ивана Грозного, поплатившись жизнью за свои выступления против царских жестокостей и не-