

Об одном энергометрическом споре

- **Очков В. Ф.¹**, доктор техн. наук, НИУ “Московский энергетический институт”, Москва
- **Егорова Н. В.**, канд. техн. наук, НИУ “Московский энергетический институт”, Москва
- **Охлопков А. В.**, ПАО “Мосэнерго”, Москва

Рукопись поступила в редакцию 03.02.2025, утверждена редколлегией в печать 29.04.2025.

Рассказано о том, как спор об самой мощной ТЭЦ Мосэнерго перерос в научно-практическую дискуссию о несовершенстве системы электрических и тепловых единиц, применимо к современным компьютерным вычислениям.

Ключевые слова: ТЭЦ, тепловая мощность, электрическая мощность, КПД, температура.

Тепло- и электроснабжение Москвы осуществляется ПАО “Мосэнерго”, самой крупной теплогенерирующей компанией Российской Федерации. ПАО “Мосэнерго” включает в себя 13 ТЭЦ (июнь 2025 г.), расположенных в разных округах столицы и в Подмосковье. В настоящей статье выясняется, какая московская ТЭЦ является самой мощной, и попутно рассматривается влияние теплотехнических и метрологических характеристик на географическое расположение электростанций.

Вот сквозная историческая нумерация ТЭЦ Мосэнерго: ГЭС-1 им. Смидовича (Раушская, МГЭС-1), ГЭС-2 филиал ГЭС-1, ГРЭС-3 им. Классона, ГРЭС-4 Каширская, ГРЭС-5 Шатурская, ТЭЦ-6 Орехово-Зуевская, ТЭЦ-7 Краснопресненская, ТЭЦ-8 (ТЭЦ Треста “Жиркость”), ТЭЦ-9, ГРЭС-10 (сейчас не существует), ТЭЦ-11 им. Уфаева (Сталинская), ТЭЦ-12 Фрунзенская, ГЭС-13 (Угличская), ГЭС-14 (Рыбинская), ТЭЦ-15 (Алексинская), ТЭЦ-16 Ленинградская, ТЭЦ-17 Ступинская, ГРЭС-18 Щёлковская, ГРЭС-19 Черепецкая, ТЭЦ-20 Калужская, ТЭЦ-21 (Ховринская), ТЭЦ-22 Люберецкая (им. Серебряникова), ТЭЦ-23 (Щёлковская), ГРЭС-24 (Рязанская), ТЭЦ-25 (Очаковская), ТЭЦ-26 Южная, ТЭЦ-27 Северная, ТЭЦ-28 (теперь очередь 28 ТЭЦ-21), ТЭЦ-29 ГТУ-ТЭЦ г. Электросталь (ныне подразделение ГРЭС-3), ТЭЦ-30 ГТУ-ТЭЦ, ТЭЦ-31 РТС Терёшково, ТЭЦ-32, ТЭЦ-33 РТС Тушино-5, ТЭЦ-34 КТС-11А, ТЭЦ-35 ГТУ-ТЭЦ г. Павловский посад и ТЭЦ-37 РТС Жулебино. Из этого списка действующими являются только пятнадцать (см. конец статьи).

На официальном сайте ПАО “Мосэнерго” представлены основные характеристики станций. Данные на начало 2025 г. об электрической N_e (в мегаваттах) и тепловой N_t (в гигакалориях в час) мощности московских станций сведены в таблицу. ТЭЦ-24 в 2008 г. вышла из состава ПАО “Мосэнерго” и стала седьмым блоком Рязанской ГРЭС ОГК-2, поэтому сведения об этой станции в таблице отсутствуют.

Согласно официальным данным, по электрической мощности самой крупной оказалась ТЭЦ-26, а по тепловой – ТЭЦ-21. Примечательное совпадение: ТЭЦ-26 расположена на юге Москвы (второе её название “Южная”), а ТЭЦ-21 – на севере (рис. 1). Юг, как известно, больше требует электричества (для работы кондиционеров, например), а север – тепла для обогрева.

Попытаемся просуммировать эти два вида энергии, тепловую и электрическую, производимых за единицу времени, сделав это на компьютере с программой, поддерживающей единицы измерения – в среде, например, свободно распространяемой физико-математической программы SMath Studio [1], но... На рис. 2 показан протокол такого расчёта с режимом контроля не только единиц измерения, но и самих физических величин.

Нельзя складывать электрическую (механическую) энергию с тепловой² – это разные физические величины с одинаковыми единицами измерения (*примечание 1*). Возникает вопрос об единицах измерения энергии и других физических величин (температуры, например) в компьютерных вычислениях. Эти два вида энергии – тепло и электричество отличаются не только формально единицами измерения (мегаватты и килокалории в час), но и своей физической сутью. Из определённого количества электрической энергии можно получить вдвое-втрое больше тепловой энергии посредством теплонаносной установки,

¹ Очков Валерий Федорович: OchkovVF@mpei.ru

² Механическая (кинетическая энергия) – это когда все молекулы движутся в одну сторону с летящим объектом, а тепловая – когда все молекулы хаотично движутся (колеблются) в разные стороны у нагретого объекта.

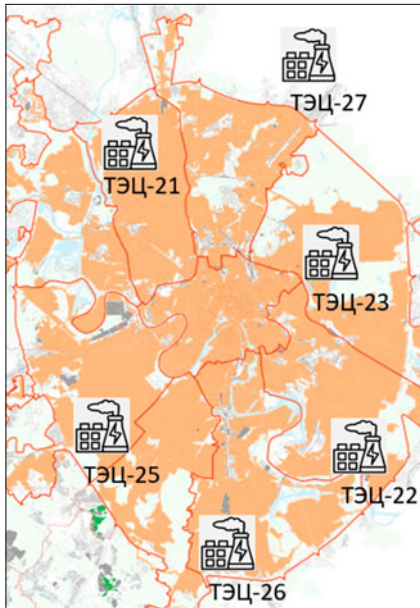


Рис. 1. Крупнейшие ТЭЦ Мосэнерго на карте Москвы

например. А вот из тепловой энергии, наоборот, можно сгенерировать в 2 – 3 раза меньше электрической энергии; в противном случае мы бы говорили о существовании вечного двигателя второго рода, нарушающего законы термодинамики. Невозможность работы вечного двигателя первого рода, основанного на преобразования механической энергии, сразу бросается в глаза. С “тепловым” же двигателем не всё так очевидно. Кафедре теоретических основ теплотехники (ТОТ [2]) МЭИ нередко приходится давать заключения по теплотехническим проектам, которые в завуалированной форме содержат нарушения законов термо-

Примечание 1. Классический пример разных физических величин с одинаковыми единицами измерения – это работа и крутящий момент. У двигателя внутреннего сгорания два важных параметра – уже рассмотренная нами мощность (работа, деленная на время) и крутящий момент при разных оборотах двигателя: сила, какую развивает вал на конце рычага, отстоящего от вала на один метр. Работа измеряется джоулями, а крутящий момент – ньютонами, умноженными на метр. Первая величина скалярная, а вторая векторная. Мощность автомобиля, кстати, измеряют не ваттами (мегаваттами), а лошадиными силами.

Удельная работа газовой турбины:

$$l_{ГТ} := h_3 - h_4 = 692.74 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Удельная работа компрессора:

$$l_K := h_2 - h_1 = 268.82 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Удельная теплота, подводимая в камере сгорания:

$$q_1 := h_3 - h_2 = 221.22 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$$

Термическая эффективность ГТУ: $\eta_{ГТУ} := \frac{l_{ГТ} - l_K}{q_1} = 1.92 \frac{\text{кДж}}{\text{ккал}}$

Термический КПД цикла ГТУ: $\eta_{ГТУ} := \frac{l_{ГТ} - l_K}{q_1} = 45.77 \%$

Рис. 3. Расчёт КПД газотурбинной установки

$$N_{\text{э}} := \begin{bmatrix} 1765 \\ 1365 \\ 1430 \\ 1370 \\ 1840.9 \\ 1060 \end{bmatrix} \text{ МВт} \quad N_{\text{т}} := \begin{bmatrix} 4918 \\ 3648.5 \\ 4545 \\ 4088 \\ 4214 \\ 1876 \end{bmatrix} \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}}$$

$$N := N_{\text{э}} + N_{\text{т}} =$$

Это разные физические величины

Рис. 2. Попытка расчёта полной мощности самых крупных ТЭЦ Москвы

динамики. (Самые распространённые проекты такого рода связаны с совместной работой конденсатора паровой турбины и теплового насоса.) Французская академия наук в свое время запретила рассматривать проекты вечных двигателей, имея ввиду по умолчанию только вечные двигатели первого рода. Пришло время расширить этот запрет и на вечные двигатели второго рода.

Оценить мощность ТЭЦ можно, узнав, сколько она сжигает топлива – природного газа, если рассматривать московский регион. Но при этом дополнительно нужно знать, какие у конкретной ТЭЦ коэффициенты полезного действия (КПД) по выработке электроэнергии и тепла.

На рис. 3 показан фрагмент расчёта КПД энергетической газотурбинной установки (рис. 4), где механическая работа компрессора (l_K) и газовой турбины ($l_{ГТ}$) измеряется килоджоулями, а тепло, получаемое в камере сгорания – килокалориями

Характеристики ТЭЦ

Электростанция	$N_{\text{э}}$, МВт	$N_{\text{т}}$, Гкал/ч
ТЭЦ-21	1765	4918
ТЭЦ-22	1365	3648,5
ТЭЦ-23	1430	4545
ТЭЦ-25	1370	4088
ТЭЦ-26	1840,9	4214
ТЭЦ-27	1060	1876

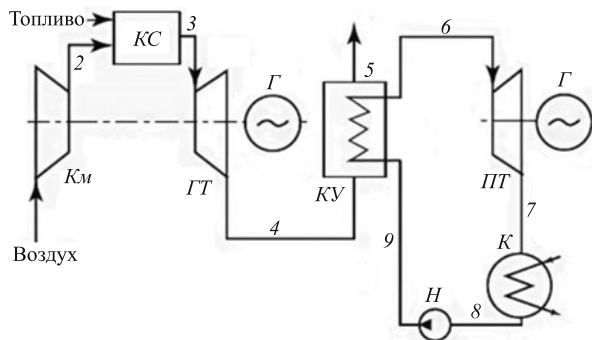


Рис. 4. Схема простейшей парогазовой установки:

Км – компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; Г – электрогенератор; КУ – котёл-утилизатор; Н – насос; ПТ – паровая турбина; К – конденсатор

(примечание 2). Всё так, как показано в таблице. Термический КПД любой установки – это отношение работы цикла к подведённому количеству тепла, т.е. к затраченной энергии. Разделив работу цикла на затраченную энергию, т.е. кДж/кг на ккал/кг, можно получить термический КПД, измеряемый килоджоулями, делёнными на килокалории, и сокращения здесь недопустимы!

Далее подсчитана более привычная величина – КПД, выраженная в безразмерных процентах: проведено сокращение калорий и джоулей при делении. Поэтому-то и называют эту величину коэффициентом. Все коэффициенты в метрологии считаются безразмерными (примечание 3). Но и это не совсем правильно. Пример: коэффициент трения – это отношение единицы силы (ньютон) к единице веса (килограмм-силы), которые нельзя сокращать. Как нельзя сокращать джоули (механи-

Примечание 2. Можно и нужно убрать множитель кило, но... привычка – вторая натура. Теплотехников и теплоэнергетиков уже не отучить писать и озвучивать, к примеру, удельную массовую энтальпию в килоджоулях на килограмм, а не просто в джоулях на грамм. Ещё трудней – почти невозможно запретить им мерить температуру разного рода градусами, а не единицами энергии. Заокеанский пример такой “привычки – второй природы”. В Национальном институте стандартов и технологий (НИСТ, США) одному из авторов этой статьи подарили справочник по свойствам воды и водяного пара, где в единицах энтропии и теплоёмкости стоял градус Ренкина, а в единице теплопроводности – градус Фаренгейта. На вопрос о том, почему получился такой метрологический разнород, ответили, что скорее можно поменять конституцию США, чем заставить американских теплотехников работать с градусом Ренкина, а не Фаренгейта в единице теплопроводности. В нашей стране переход от градусов Цельсия к кельвинам был сделан давно. Но и тут не все в порядке. Единица теплопроводности должна быть такая – ватт, умноженный на метр и делённый на квадратный метр и кельвин! И метры тут сокращать никак нельзя – теряется физический смысл единицы теплопроводности! Упомянем такой примечательный факт. До 1968 г. единицей температуры был градус Кельвина, а не кельвин. Этим переименованием пытались лишиться раз узаконить температуру как особую физическую величину.

$$\eta_{ГТУ} := 45.77 \%$$

$$b := \frac{123}{\eta_{ГТУ}} = 268.735 \quad (1)$$

$$q := 7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} = 29307.6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{q} = 3.4121 \cdot 10^{-8} \frac{\text{с}^2}{\text{м}} \quad \frac{1}{q} = 122.835 \frac{\text{г}}{\text{кВт ч}} \quad (3)$$

$$b := \frac{1}{7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \cdot \eta_{ГТУ}} = 268.4 \frac{\text{г}}{\text{кВт ч}} \quad (4)$$

Рис. 5. Расчёт удельного расхода топлива на выработку электроэнергии

ческая или электрическая энергия) и калории (тепловая энергия). Ещё одно необоснованное сокращение делают в единице вязкости, вставляя туда паскалы вместо ньютон. Это неправомерно не только в физическом и метрологическом, но и в историческом плане. Паскаль не занимался вязкостью. С ней работал Ньютон. Есть даже такое понятие – ньютонская жидкость.

КПД энергоустановки, выраженный в килоджоулях, делённых на килокалории, можно называть эффективностью – сколько работы в килоджоулях передаётся электрогенератору из одной килокалории, полученной при сжигании топлива. Максимум этой величины составит примерно 4,19 – переводной коэффициент из калории в джоуль.

Ещё одна величина, характеризующая эффективность энергоустановки, – это удельный расход условного топлива (b) на выработку одного киловатта в час электроэнергии (рис. 5).

Этот параметр в ручных расчётах обычно определяют так: делят константу 123 (её легко запомнить) на КПД энергоустановки, понимая при этом, что при 100% эффективности расходовалось бы 123 г условного топлива на выработку одного киловатт-часа электроэнергии [рис. 5, (1)]. Но при таком подсчёте ответ получается безразмерным, что не соответствует современным стандартам вычислений. Число 123 было ранее получено путём пересчёта некоторых единиц измерения, а именно энергии из калорий в джоули [рис. 5, (2)], времени из секунды в часы [рис. 5, (3)], массы из грамм в килограмм [рис. 5, (4)]. Правильная (размерная) формула для подсчёта удельного расхода топлива

Примечание 3. Ещё один теплотехнический спор про коэффициенты – как называть конкретные числовые значения теплопроводности – коэффициентом теплопроводности или просто теплопроводностью. Метрологи настаивают на том, что сугубо размерная величина не может называться коэффициентом. Теплотехники же возражают в том плане, что теплопроводность – это физическое явление, которое количественно оценивают через коэффициент теплопроводности.

Удельная энтальпия водяного пара на входе в турбину:

$$h_6 := \text{wsprHPT}(p_6, T_6) = \text{Числовое значение этой величины не имеет физического смысла}$$
$$h_6 := \text{wsprHPT}(p_6, T_6) = (790 + C) \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$$

Рис. 6. Два варианта вывода на печать значения удельной энтальпии

– выражение (4) на рис. 5. Кстати, число 7000 (теплота сгорания условного топлива – антрацита, например) также легко запомнить, как и число 123. Когда говорят о теплоте сгорания топлива, то педантично добавляют – высшая или низшая это величина. Но в нашем расчёте это не важно – мы просто упоминаем величину 7000 с единицей килокалория, делённая на килограмм (калория, делённая на грамм – см. *примечание 2*).

Чтобы подсчитать термический КПД или эффективность энергоустановки, необходимо определить удельную энтальпию (теплосодержание) h рабочего тела в разных точках термодинамического цикла. На рис. 3 индексами отмечены следующие точки газотурбинной установки (рис. 4): 1 – вход в воздушный компрессор, 2 – выход из компрессора (вход в камеру сгорания), 3 – (выход из камеры сгорания) вход в газовую турбину и 4 – выход из турбины. Рабочим телом ГТУ являются дымовые газы, однако в термодинамических расчётах в качестве рабочих тел часто принимают воздух с допущением, что это идеальный газ.

На рис. 6 показан фрагмент расчёта удельной массовой энтальпии в пакете SMATH с использованием авторского приложения WaterSteamPro и с правильным инструментарием работы с единицами измерения. В результате расчётов удельной массовой энтальпии водяного пара при заданных значениях давления и температуры возможны два режима работы:

выдаётся текстовое сообщение о некорректности этой операции,

выдается числовое сообщение с константой.

Подобная константа появляется и при взятии неопределённого интеграла. Само значение энтальпии не несёт никакой полезной информации – информация заключена в разности значений энтальпий в разных точках (рис. 3). Механический аналог: потенциальная энергия летящего камня зависит от базовой точки отсчёта высоты и, следовательно, не имеет чётко фиксированного значения. Кстати, когда говорят о высоте, на которой установлено то или иное оборудование электростанции, то упоминают (имеют ввиду) точку отсчёта – отметка от грунта или от уровня моря и др. Для

гидростатики, например, важны не абсолютные величины, а разности.

Выводить на печать (рис. 6) конкретное значение энтальпии (энтропии, внутренней энергии) нужно лишь для того, чтобы сравнить эти цифры, выведенные компьютером, с теми, которые хранятся в разного рода справочниках в виде таблиц и графиков [3].

Приведённые фрагменты расчётов касались отдельных газотурбинных (рис. 5) и паротурбинных установок (рис. 6). В настоящее время эти установки в целях повышения КПД используются совместно в виде парогазовых (бинарных) блоков электростанций. Известно, что КПД термодинамического цикла зависит от температуры нагревателя (T_n) и температуры холодильника (T_x). В частности, у самого совершенного цикла Карно (две изотермы и две адиабаты) формула для расчёта КПД имеет вид

$$\eta_t = 1 - \frac{T_x}{T_n}.$$

Газотурбинная установка в бинарном цикле повышает температуру нагревателя, а паротурбинная понижает температуру холодильника. Вследствие этого КПД паротурбинной установки получается выше, чем у отдельных ГТУ и ПТУ.

На рис. 7 показан завершающий расчёт КПД парогазовой установки (рис. 4), в частности, определение кратности циркуляции m – отношения массового расхода первого рабочего тела (воздух/дымовые газы) к массовому расходу второго рабочего тела (вода и водяной пар). Традиционно параметр m считается безразмерным, но это не так: килограммы, делённые на килограммы, нельзя упростить до единицы, так как это разные килограммы – килограммы воздуха (дымовых газов) и килограммы воды/водяного пара. Это учитывает компьютерная вычислительная система, в среде которой выполнялся расчёт.

В расчёте (рис. 7) присутствуют и калории, и джоули, и константа в численном ответе по энтальпии – все так, как было отмечено ранее и как этого требуют современные стандарты вычислений на компьютере.

Один из основных параметров в теплотехнических расчётах – это температура. На рис. 8 показан ввод температуры наружного воздуха в расчёт. Вводится значение 15 градусов по шкале Цельсия³, которое в памяти компьютера хранится с единицей энергии, делённой на единицу количества вещества. После ввода в компьютер значение температуры для контроля можно вывести по другим шкалам и градусам – Кельвина (K), Фаренгейта (°F), Ренкина (Ra) и даже Реомюра (Re). Закон же идеального газа при этом принимает законченный и лаконичный вид: $pv = T$, где v – удельный молярный объём, p – давление, а T – температура.

³ Именно так нужно озвучивать: 15 градусов по шкале Цельсия, а не 15 градусов Цельсия. Градус Цельсия равен кельвину.

Удельная энтальпия газа на выходе из котла-утилизатора: $h_5 := \text{wspgHGST}(GS, T_5) = (96.62 + c) \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$

Часть теплоты выхода газовой турбины тратится на выработку пара в котле-утилизаторе

$$m := \text{solve}\left(m \cdot (h_4 - h_5) = h_6 - h_9, m\right) = 8.198 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

Удельная теплота, подводимая к ПГУ: $q_{11} := m \cdot (h_3 - h_2) = 1814 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$

Удельная полезная работа газовой части ПГУ: $l_{ГТУ} := (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) = 423.9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Удельная полезная работа пароводяной части ПГУ: $l_{ПТУ} := (h_6 - h_7) - (h_9 - h_8) = 1308 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Термический КПД парогазовой установки: $\eta_{ПГУ} := \frac{l_{ГТУ} + l_{ПТУ}}{q_{11}} =$

Это разные физические величины

$$\eta_{ПГУ} := \frac{m \cdot l_{ГТУ} + l_{ПТУ}}{q_{11}} = 62.99 \%$$

Термическая эффективность: $\eta_{ПГУ} = 2.637 \frac{\text{кДж}}{\text{ккал}}$

Рис. 7. Окончание расчёта КПД парогазового цикла

$$T_1 := 15 \text{ } ^\circ\text{C} = 2396 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}} = 288.15 \text{ K} = 59 \text{ } ^\circ\text{F} = 518.67 \text{ } ^\circ\text{Ra} = 12 \text{ } ^\circ\text{Re}$$

Рис. 8. Ввод с последующим выводом значения температуры

Универсальная газовая постоянная – это константа для перевода кельвинов в джоули, делённые на моли.

Об этой спорной особенности компьютерных расчётов с подключённым механизмом оперирования физическими величинами можно прочесть, например в [4].

Когда стало ясно, что температура – это не какая-то особая эмпирическая величина, а особый вид энергии, то возник некий метрологический кризис, связанный с расчётами. В целях облегчения ручных расчётов поступили так – оторвали температуру от энергии и присвоили ей особую именную единицу измерения. Тут-то по ряду причин вспомнили про британского физика и теплотехника Уильяма Томпсона (1824 – 1907), хотя были и более достойные претенденты на такую метрологическую честь – Больцман, например. Но буква Т (тесла) была уже задействована под магнитную индукцию. Учли то, что лаборатория Томпсона находилась вблизи шотландской реки под названием Кельвин и что буквы К пока нет в списке единиц физических величин. Вышли из затруднения так. Томпсону присвоили титул лорда (барона) Кельвина (Кельвина), а единице измерения температуры – букву К. Хотя более логичным было бы к температуре прикрепить букву Т и измерять её томпсонами, а не кельвинами. Лорд Кельвин в физике известен в основном благодаря эффекту Джоуля-Томпсона. Джоуля увековечили в единице энергии.

История с единицей измерения температуры, кстати, в чём-то похожа на ранее описанную историю с двумя видами энергии – электрической (механической) и тепловой, выдаваемой ТЭЦ. Там тоже используют две единицы – мегаватты и гигакалории, делённые на час.

Обратимся к измерению силы (интенсивности) звука в акустике. Если использовать мощность (ватты) звукового давления, делённую на площадь, то будут получаться величины в огромном численном диапазоне, что неудобно при ручных расчётах и при озвучивании ответов. Ввели единицу измерения звука – децибел, математическая величина, определяемая как логарифм от величины мощности. Логарифм, кстати, присутствует и в энтропии, которая имеет общий физический смысл: *логарифм числа доступных состояний системы*. Откуда тут взялся логарифм?! А всё отсюда же – из желания упростить ручные расчёты.

В приведенных ранее расчётах используется энтальпия – термодинамический потенциал, или теплосодержание. Удельная массовая энтальпия – это удельная внутренняя энергия, к которой прибавили произведение давления на удельный массовый объём (температуру). Так вот, замена произведения давления и удельного молярного объёма на температуру расставит всё на своих местах: складываются два вида энергии – второй вид (тепло) и третий вид (температура)!

Ещё один спор, вытекающий из спора об единицах измерения температуры, возник относительно молярной массы воды и водяного пара –

$p := 1 \text{ atm} = 1.0133 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ Водяной пар $T := 200 \text{ }^\circ\text{C} = 3934 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$ $v := \frac{T}{p} = 0.0388 \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$ $v_{\text{mass}} := \text{wspVPT}(p, T) = 2.144 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ $\frac{v}{v_{\text{mass}}} = 18.1094 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$	Вода $T := 20 \text{ }^\circ\text{C} = 2437 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$ $v := \frac{T}{p} = 0.0241 \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$ $v_{\text{mass}} := \text{wspVPT}(p, T) = 0.001002 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ $\frac{v}{v_{\text{mass}}} = 24010 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$
--	---

Рис. 9. Расчёт молярной массы воды и водяного пара

основного рабочего тела и теплоносителя тепловых, атомных и гидравлических электростанций. В истинном законе идеального газа ($pv = T$), не обременённого универсальной газовой постоянной, переменная v – это удельный молярный объём – объём, который занимает один моль вещества. Моль – это число структурных единиц вещества, равное числу Авогадро. Но функция с именем *wspVPT* авторского пакета WaterSteamPro выдаёт значение удельного массового, а не молярного объёма воды или водяного пара, что можно использовать для такого расчёта. На рис. 9 показано определение молярной массы воды (при 20°C) и водяного пара (при 200°C) при атмосферном давлении.

У водяного пара подсчитанная молярная масса примерно отвечает химической формуле воды H_2O : $1 \times 2 + 16 = 18$. У воды же эта величина оказалась на четыре порядка выше. Это можно объяснить, если вспомнить, что вода – это не механическая смесь молекул, состоящих из двух атомов водорода и одного атома кислорода, а некий своеобразный полимер, где водородные связи образуют сложные ассоциаты. Вот эти-то соединения воды и нужно подсчитывать, оценивая молярную массу воды. Размер этих ассоциатов зависит от параметров воды – давления, но, главным образом, от температуры. Этим, в частности, объясняется тот факт, что при атмосферном давлении вода имеет максимальную плотность (обратная величина удельного массового объёма) при 4°C, а удельная изобарная теплоёмкость имеет минимальное значение при температуре теплокровных животных. Была неоправдавшаяся гипотеза о том, что магнитная обработка воды – её пропуск между полю-

сами магнита влияет на упомянутые водородные связи [5], разрушая или, наоборот, укрупняя эти самые ассоциаты. Магнитной обработкой технической воды в своё время пытались бороться с отложениями в конденсаторах турбин. Один из примеров – ТЭЦ-26 Мосэнерго [6], где промышленные эксперименты не дали однозначных результатов.

Кстати, об упомянутой теплоёмкости. Четыре известных её вида – адиабатная, изотермическая, изохорная и изобарная – имеют одинаковые размерности энергии, делённой на температуру. В этой дроби может появиться и единица массы, количества вещества или объёма, если речь идет об удельных величинах. Такую же единицу измерения имеет и энтропия. Но это обстоятельство не делает возможным сложение этих величин (см. начало статьи, где описан запрет на суммирование электрической и тепловой мощностей ТЭЦ⁴).

Удельная массовая энтропия наряду с удельной массовой энтальпией, как правило, присутствует в теплотехнических расчётах. В частности, диаграмма “энтальпия – энтропия” (диаграмма Моляе) по вертикальной оси фиксирует процесс изменения теплосодержания при работе рабочего тела, например, при расширении пара в турбине, а по горизонтальной оси – газодинамическое совершенство этого процесса. Так вот, если в единице удельной молярной энтропии кельвины заменить на истинные единицы температуры, то эта величина станет безразмерной. И в этом нет ничего удивительного, если вспомнить о том, что в общефизическом смысле энтропия – это логарифм числа доступных состояний системы. Логарифм⁵ тут оказался по той же самой причине, почему температуру стали измерять кельвинами. Всё это было сделано, повторяем, для удобства ручных вычислений. Компьютерные же вычисления перестали нуждаться в этих “удобствах”.

Краткий частный вывод по статье таков: современные системы поддержки физических величин при компьютерных расчётах требуют включения в себя элементов искусственного интеллекта (ИИ)! В частности, энергию необходимо разделить не на два, а на три рода, вернув температуре её четкий

⁴ Правда, если из удельной молярной изохорной теплоёмкости вычесть её изобарную тезку, то получится универсальная газовая постоянная, которая по своей сути является переводным коэффициентом из кельвинов в истинную единицу температуры – джоуль, деленный на моль. И это мы уже отметили.

⁵ Его прописали на могиле Больцмана – учёного, введшего (с Максвеллом) в термодинамику, вернее, в молекулярно-кинетическую теорию понятие энтропии.

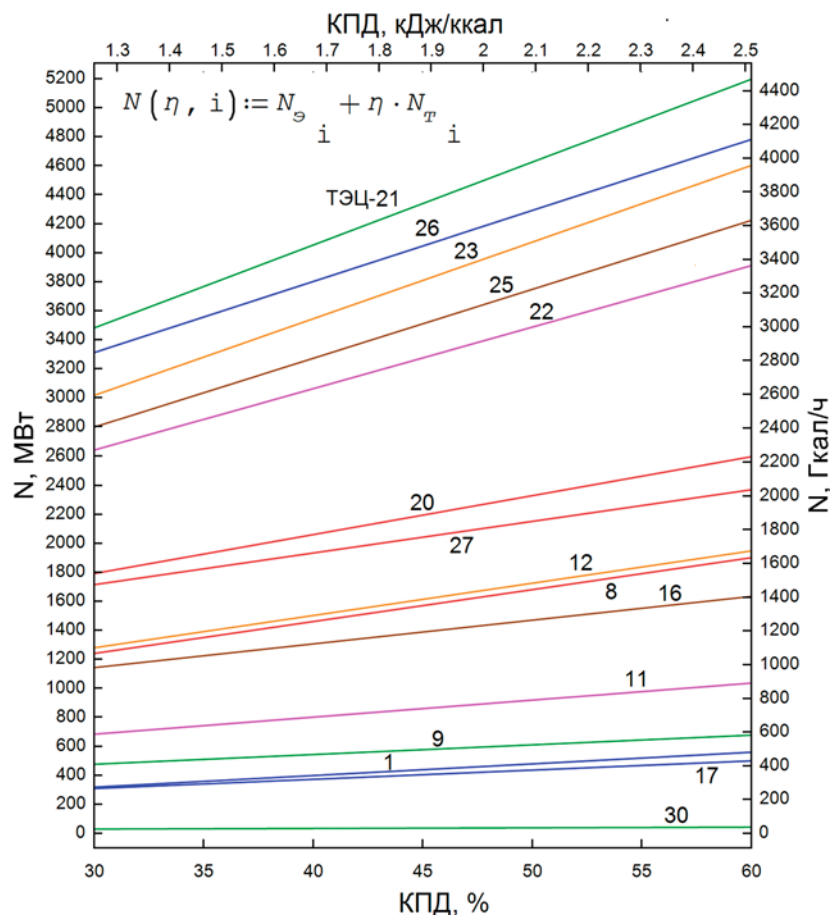


Рис. 10. Суммарная мощность пятнадцати ТЭЦ Мосэнерго (конец 2024 г.) в зависимости от КПД

физический смысл, не отвергая, конечно, цельсии, кельвины, фаренгейты и прочие реомюры (рис. 8). Два рода энергии мы рассмотрели в самом начале статьи. Третий род энергии – температуру – физики, кстати, давно уже измеряют единицами энергии – электрон-вольтами, например. Но тут можно возразить в том плане, что почти все эмпирические формулы ориентированы именно на кельвины, а не на джоули, делённые на моли. Вот тут-то и поможет искусственный интеллект! Уже появились компьютерные вычислительные системы, которым можно сообщить через клавиатуру или просто голосом то, что мы собираемся посчитать, и на экране появится нужная формула или набор формул с соответствующими пояснениями (формуляциями) и, главное, с чёткими правилами работы с физическими величинами. Сам же процесс расчёта при этом превращается в диалог человека с ИИ.

А что касается начального спора о самой мощной московской ТЭЦ, то он решился довольно просто – стоит только построить графики, показанные на рис. 10. К электрической мощности ТЭЦ (таблица) прибавлялась тепловая, уменьшенная на величину КПД станции по выработке электроэнергии в диапазоне от 30 до 60%. Задача уп-

ростилась вследствие того, что прямые линии на графиках не пересекаются и находятся довольно далеко друг от друга.

И ещё одна деталь. Если в формуле мощности ТЭЦ

$$N(\eta, i) = N_{\text{э}} + \eta N_{\text{т}}$$

использовать значение КПД, выраженное не в безразмерных процентах, а в джоулях, делённых на калории (рис. 7), то суть расчёта это не изменит, но сделает его более понятным в плане корректной работы с физическими величинами и единицами измерения.

Так, термодинамика позволила нам не только найти абсолютного лидера по мощности среди московских ТЭЦ, но и расставить их “по росту”: ТЭЦ-21, -26, -23, -25, -22, -20, -27, -12, -8, -16, -11, -9, -1, -17 и ТЭЦ-30.

Можно также поспорить о рекордсменах по общей выработке электрической и/или тепловой энергии: какая московская ТЭЦ наработала больше всего энергии с момента пуска? Здесь уже придётся рассматривать не только самые мощные ТЭЦ, построенные во второй половине прошлого века (таблица: ТЭЦ-21 введена в эксплуатацию 22 октября 1963 г., а ТЭЦ-27 – 25 декабря 1992 г.), а

все станции за весь период их работы. А это задача очень трудная, связанная с новым направлением информационных технологий под названием Big Data: обработка структурированных и неструктурированных данных огромных объёмов [7].

Если говорить не о мощности ТЭЦ, а об их выработке, то можно отметить такой метрологический нюанс: базовая единица мощности – это ватт, а базовая единица энергии – джоуль. Но на практике единицы джоуль (Дж) почему-то стараются избегать. Что касается выработки именно тепловой энергии, то тут используют по традиции или по другим причинам не джоули (с приставками гига-, тера- и пр.), а гигаватты в час. И платим мы дома не за 3,6 килоджоуля, а за один киловатт-час.

Кстати, о платежах за джоули и калории! Рекордсмена среди ТЭЦ можно попытаться определить по тому количеству денег, какое зарабатывает электростанция на производстве тепла и электричества. Но и здесь не всё так просто, если учитывать как на рынок электроэнергетики влияют различные факторы – не только технико-экономические, но и политические.

Выводы

Переход к компьютерным вычислениям с использованием физических величин не только упрощает и ускоряет расчёты, исключает из них многие ошибки, но и требует глубокого пересмотра самой системы единиц измерения. К этому нас призывают новые информационные технологии с элементами искусственного интеллекта.

Соблюдение этических норм

- У авторов нет соответствующих финансовых или нефинансовых интересов.
- Авторы не заявляют о каких-либо конкурирующих интересах, имеющих отношение к содержанию данной статьи.

- Все авторы подтверждают, что они не связаны с какой-либо организацией или юридическим лицом, имеющим какой-либо финансовый или нефинансовый интерес к предмету или материалам, обсуждаемым в этой рукописи.
- Авторы не имеют финансовых или имущественных интересов в отношении каких-либо материалов, обсуждаемых в этой статье.

Список использованных источников и литературы

1. Очков, В. Ф. Техническая термодинамика: расчеты на SMath : учебное пособие для вузов [Электронный ресурс] / В. Ф. Очков, И. Г. Ахметова, Н. В. Егорова, Ю. В. Шацких. – СПб.: Лань, 2025. – 252 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/469055> (дата обращения: 21.06.2025).
2. Очков, В. Ф. Теоретические основы теплотехники Или размышления у мемориальных досок [Электронный ресурс] / В. Ф. Очков // Энергия: экономика, техника, экология. – 2024. – № 10. – С. 9 – 24. – URL: <http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/EEE-10-2024-TOET.pdf>.
3. Александров, А. А. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: справочник [Электронный ресурс] / А. А. Александров, К. А. Орлов, В. Ф. Очков. – М.: Издат. дом МЭИ, 2009. – URL: <http://tw.t.mpei.ac.ru/rbtp/index.html>.
4. Очков, В. Ф. Когда $p_v = T$ [Электронный ресурс] / В. Ф. Очков, К. А. Орлов // Законодательная и прикладная метрология. – 2022. – № 2. – С. 38 – 44. – URL: <http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-ZPM.pdf>.
5. Очков, В. Ф. Физика и метафизика магнитной обработки воды [Электронный ресурс] / В. Ф. Очков // Энергия: экономика, техника, экология. – 2022. – № 1. – С. 36 – 43. – URL: <http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/Energia-MO-1-2021.pdf>.
6. Домнин, А. И. Гидромагнитные системы – устройства для предотвращения образования накипи и точечной коррозии / А. И. Домнин // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 12(28). – С. 31 – 32.
7. Елисейкин, М. М. О метрологических характеристиках исторических данных [Электронный ресурс] / М. М. Елисейкин, В. Ф. Очков // Законодательная и прикладная метрология. – 2024. – № 5. – С. 47 – 51. – URL: <http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/ZPM-5-2024-49-53.pdf>.