

Metal Consumption of Heat Engines and Heat Capacity of their Working Fluids

Kiselev V.G., Kalyutik A.A., Kukolev M.I.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. Ensuring efficient energy supply in general and heat supply in particular together with creation of air conditioning systems is a very urgent task of modern energy industry, particularly acute in the absence of large centralized energy sources. The cost of such systems is largely related to the cost of heat engines operating both in the direct and reverse cycle, in its turn determined by their construction and installation costs that are directly related to their metal consumption. Our goal was to reduce metal consumption of heat engines. It had been achieved with the use of thermodynamic potentials and thermodynamic cycles in conjunction with a model idea of the ideal gas, Carnot and Phillips heat engines, etc. The most significant result was mathematical formulas that for a given efficiency linked the heat capacity of the ideal gas with the geometric dimensions of heat engines under consideration, the working cylinder volume of the Carnot heat engine and the amount (volume) of metallic mesh participating in heat exchange with the working body of the Philips heat engine. Significance of these results lies in establishing a steady trend of reducing metal consumption of Philips and Carnot heat engines with a reduction in heat capacity of the ideal gas used as their working body. As Carnot and Philips cycles are model cycles used for analyzing other heat engines, including those utilizing real gas systems, this clearly shows the possibility of reducing metal consumption of real heat engines while reducing heat capacity of their working fluids.

Keywords: heat engine, thermodynamic potentials, Gibbs free energy, cycle, ideal gas, metal consumption, heat pump, refrigerator, compressor.

DOI: 10.5281/zenodo.3898237

UDC: 536.8

Consumul de metal al motoarelor de căldură și capacitatea de căldură a fluidului lor de lucru

Kiselev V.G., Kalyutik A.A., Kukolev M.I.

Petru cel Mare Universitatea Politehnică din Sankt Petersburg
Saint-Petersburg, Federația Rusă

Rezumat. Asigurarea aprovizionării eficiente cu energie în general și a furnizării de căldură în special, împreună cu crearea sistemelor de climatizare este o sarcină foarte actuală a energiei moderne. Costul sistemelor de acest tip este în mare parte legat de costul motoarelor de căldură. Scopul studiului este de a reduce consumul de metal al motoarelor de căldură. Acest obiectiv este atins prin utilizarea metodelor potențialelor termodinamice și a ciclurilor termodinamice. Aceste metode sunt utilizate împreună cu reprezentarea modelului motoarelor termice cu gaz ideal, Carnot și Philips etc. Rezultatul cel mai semnificativ constă în obținerea formulelor matematice, care leagă capacitatea de căldură a unui gaz ideal cu dimensiunile geometrice ale modelelor motoarelor de căldură luate în considerare, menținând în același timp eficiența acestora. În cazul mașinii Carnot, acesta este volumul cilindrului de lucru, iar pentru mașina Philips, aceasta este cantitatea (volumul) de plasă metalică care participă la schimbul de căldură cu fluidul său de lucru. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că, în cursul cercetării, a fost stabilită o tendință constantă de a reduce consumul de metale ale motoarelor termice Philips și Carnot, cu o scădere a capacității de căldură a gazului ideal, care este utilizat ca fluid de lucru în ele. Datorită faptului, că ciclul Carnot și ciclul Philips sunt cicluri model care sunt utilizate pentru a analiza funcționarea altor motoare de căldură, inclusiv, a celor care folosesc sisteme de gaz real, acest lucru indică în mod clar posibilitatea de a reduce consumul de metal al motoarelor reale de căldură, reducând totodată capacitatea de căldură a corpurilor lor de lucru.

Cuvinte-cheie: motor termic, potențial termodinamic, energie Gibbs, ciclu, gaz ideal, consum de metale, pompă de căldură, frigider, compresor.

Металлоёмкость тепловых машин и теплоёмкость их рабочего тела**Киселев В.Г., Калютник А.А., Куколев М.И.**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Обеспечение эффективного энергоснабжения вообще и теплоснабжения в частности в совокупности с созданием систем кондиционирования воздуха является весьма актуальной задачей современной энергетики. Особую остроту эта проблема принимает при отсутствии крупных централизованных источников тепла и особенно электроэнергии. Стоимость систем подобного типа во многом связана с затратами на тепловые машины, работающие, как по прямому, так и по обратному циклу, что, в свою очередь, во многом определяется капитальными затратами на их сооружение и установку, которые, прямо связаны с их металлоёмкостью. Цель исследования заключается в снижении металлоёмкости тепловых машин. Поставленная цель достигается за счет использования методов термодинамических потенциалов и термодинамических циклов. Эти методы применяются в совокупности с модельным представлением об идеальном газе, тепловых машинах Карно и Филиппса и др. Наиболее существенным результатом является получение математические формул, связывающих теплоёмкость идеального газа с геометрическими размерами моделей рассматриваемых тепловых машин при сохранении их коэффициента полезного действия. В случае машины Карно — это объём рабочего цилиндра, а у машины Филиппса — это количество (объём) металлической сетки, принимающей участие в теплообмене с её рабочим телом. Значимость полученных результатов состоит в том, что в процессе проведённых исследований установлена тенденция снижения металлоёмкости тепловых машин Филиппса и Карно со снижением теплоёмкости идеального газа, который используется в них в качестве рабочего тела. В силу того, что цикл Карно и цикл Филиппса являются модельными циклами, которые применяется для анализа работы других тепловых машин, в том числе и использующих реальные газовые системы, это однозначно свидетельствует о возможности снижения металлоёмкости реальных тепловых машин при снижении теплоёмкости их рабочих тел.

Ключевые слова: тепловой двигатель, термодинамические потенциалы, энергия Гиббса, цикл, идеальный газ, металлоёмкость, тепловой насос, холодильник, компрессор.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время различные виды тепловых машин широко применяются в практически во всех сферах человеческой деятельности. Они могут работать как по прямому термодинамическому циклу, как собственно двигатели, так и по обратному, как тепловые насосы [1–4].

Не менее известный факт — применение тепловых машин, для кондиционирования воздуха и в холодильной технике.

Всё сказанное указывает на их крайне широкую распространённость, а, следовательно, и важность работ по повышению их технико-экономических показателей.

Известно, что различные мероприятия по совершенствованию отдельных характеристик тепловых машин вообще и тепловых двигателей в частности имеют длительную историю и не потеряли своей актуальности и в настоящее время.

Среди них можно выделить следующие направления:

1. Повышение коэффициента полезного действия тепловых машин;

2. Повышение мощности тепловых машин на единицу их веса;

3. Улучшения экологических показателей тепловых машин, их надёжности и др. характеристик [5–6].

Все эти направления совершенствования и прежде всего «повышение мощности тепловых машин на единицу их веса» в той или иной степени связаны с таким показателем, как их материалоемкость, а более конкретно и в большинстве реальных случаев — металлоёмкость. В дальнейшем эти два термина мы будем использовать, практически как синонимы. На улучшение именно этой характеристики направлены основные силы проектировщиков и производителей этих изделий, особенно если речь идёт о создании и модернизации машин большой мощности. Однако, подавляющее большинство работ, посвящённых материалоемкости изделий [7–9], которая обычно выражается в процентах стоимости используемых материальных ресурсов в структуре себестоимости продукции относится к области экономики. Аналогичная ситуация наблюдается и в области работ, связанных с металлоёмкостью [10–12]. К сожалению, в научно-технической сфере, публикации связывающие напрямую какие-либо параметры тепловых машин с их металлоёмкостью авторам неизвестны,

иными словами, поиск источников подобного рода ничего не выявил, что позволяет предположить «пионерский» характер данной статьи. Вместе с тем, работы, посвящённые влиянию отдельных параметров рабочего тела (прежде всего свободной энергии Гиббса) тепловой машины на её к. п. д. существуют, что можно рассматривать в какой-то степени, если не аналогом, то предвестником данной публикации. Действительно, данные работы анализируют влияние такого параметра идеального газа [13–26], который используется в качестве рабочего тела квазистатических тепловых машин Филиппа и Карно, как теплоёмкость [17], на геометрические размеры их рабочих цилиндров, а, следовательно, и на их металлоёмкость.

В тоже время, следует отметить, что обобщённое теоретическое обоснование необходимости проведения работ именно в этом направлении до настоящего времени практически отсутствует.

Данная статья в какой-то степени призвана решить именно эту проблему, основываясь, прежде всего на таких модельных представлениях, как тепловые машины Филиппа и Карно.

Выбор именно этих объектов исследования далеко не случаен, а обусловлен тем обстоятельством, что снижение температуры рабочего тела в этих циклических процессах достигается двумя принципиально различными с точки зрения термодинамики способами, а именно – совершением сторонней работы и теплопередачей.

Всё это взятое вместе, позволяет рассматривать совокупность этих циклических процессов, как некоторую модель реальных термодинамических циклов. Иными словами, целью данной работы является термодинамический анализ процесса работы обратимых тепловых двигателей Филиппа и Карно, и разработка на его основе основных принципов по снижению их металлоёмкости.

Для реализации поставленной цели нам придётся решить следующие задачи:

1. Провести термодинамический анализ процесса функционирования модельных тепловых машин Карно и Филиппа с рабочим телом – идеальный газ.

2. Установить взаимосвязь между термодинамическими параметрами рабочего

тела – идеальный газ (его молярной теплоёмкостью при постоянном объёме) и характеристиками тепловых машин Филиппа и Карно, включая вывод расчётных формул для определения зависимости между теплоёмкостью идеального газа и объёмом рабочего цилиндра тепловой машины, который непосредственно связан с её металлоёмкостью.

3. Произвести верификацию применённого метода термодинамических потенциалов и полученных на его основе соотношений, связывающих объём рабочего цилиндра тепловой машины (металлоёмкость) и молярную теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме путём численных расчётов.

Остановимся на решении этих проблем несколько подробнее в следующих разделах этой работы.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе использован один из самых широко распространённых в современной термодинамике аналитических методов исследования, который получил название метода термодинамических потенциалов (или характеристических функций), к основным достоинствам которого можно отнести его пригодность для анализа нециклических процессов, например, таких, как химические реакции, диффузионные процессы, процессы смешения (образования растворов) и т. д. Суть его, изложенная практически в любой книге по термодинамике, заключается в том, что основное термодинамическое уравнение позволяет для квазистатической термодинамической системы вывести некоторые функции состояния, называемые термодинамическими потенциалами, изменение которых при изменении состояния системы, является полным дифференциалом.

Базируясь на этом обстоятельстве, можно составить математические уравнения, пригодные для описания рассматриваемого процесса, что мы и продемонстрируем в рамках данной статьи.

Кроме того, в работе использован ряд модельных представлений таких как идеальный газ, цикл Карно, цикл Филиппа и других, и классический метод термодинамических циклов, которые также широко представлен практически в любой книге по технической термодинамике.

**ТЕПЛОВАЯ МАШИНА КАРНО И
ЗАВИСИМОСТЬ ЕЁ ОТДЕЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ОТ
ТЕПЛОЁМКОСТИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА**

Анализ работы термодинамического цикла Карно с рабочим телом «идеальный газ» можно найти практически в любом курсе термодинамики. Поэтому, для изучения влияния молярной теплоёмкости идеального газа при постоянном объёме прежде всего на объём рабочего цилиндра тепловой машины Карно, а, следовательно, и на её металлоёмкость воспользуемся одним из вариантов исследования этого вопроса, опираясь, например, на монографию И. Пригожина [18, стр. 83–86].

На рис. 1 помещён график циклической работы машины Карно. Кроме того, с целью упрощения дальнейших расчётов примем, что рассматриваемое устройство, находится под нулевым внешним давлением, а для анализа его функционирования используем, в том числе, и теорию термодинамических потенциалов, принимая, что в системе в качестве рабочего тела всегда имеется только один моль идеального газа.

Такт 1. Изотермический переход при температуре.

Идеальный газ. Переход $A - B$.

В этом случае в соответствии с И. Пригожиным [18, стр. 84], сторонняя работа, совершаемая одним молем идеального газа на изотерме $A - B$, определяется следующим выражением:

$$A_{AB} = \int_A^B PdV = RT_A \ln \frac{V_B}{V_A} \quad (1)$$

где P — давление газа; V — текущий объём газа; V_A и V_B — объём идеального газа в начале и конце верхней изотермы цикла Карно, соответственно; T_A — температура газа в верхней изотерме цикла Карно, а R — универсальная газовая постоянная.

В таком изотермическом процессе с участием идеального газа, теплота Q_{AB} поглощается из резервуара и при этом выполняется следующее соотношение:

$$A_{AB} = Q_{AB} \quad (2)$$

В этом случае теплоёмкость идеального газа не влияет на рассматриваемый изотермический процесс, так как температура и количество рабочего тела остаются неизменными, а энергетические затраты на работу, производимую в рассматриваемой системе, полностью компенсируются за счёт тепла, подводимого к ней. В данной модели в соответствии с двумя предыдущими формулами конечный объём верхней изотермы V_B равен следующей величине:

$$V_B = V_A e^{\frac{Q_{AB}}{RT_A}} \quad (3)$$

В свою очередь изменение объёма рабочей части цилиндра тепловой машины V_{AB} , на верхней изотерме $A - B$, исходя из последних трёх соотношений будет равно:

$$V_{AB} = V_A (e^{\frac{Q_{AB}}{RT_A}} - 1) \quad (4)$$

Такт 2. Адиабатический переход.

Идеальный газ. Переход $B - C$.

Известно, что единственным источником энергии для совершения сторонней работы ABC , при адиабатическом расширении идеального газа является изменение его внутренней энергии [19, с. 14–17]. Вместе с тем для проведения дальнейших исследований нам необходимо знать характеристики идеального газа (объём и давление) в момент окончания правой адиабаты при температуре T_C (начало «нижней» изотермы идеального газа). Для решения этой задачи воспользуемся данными из монографии И. Пригожина [18, с. 84–85] в отношении адиабатического перехода системы из точки B в точку C в рамках которого установлено, что работа, совершаемая на этом пути, определяется следующим соотношением:

$$A_{BC} = \int_{V_B}^{V_C} PdV = \int_{V_B}^{V_C} \frac{P_B V_B^\gamma}{V^\gamma} dV = \frac{P_C V_C - P_B V_B}{1 - \gamma} \quad (5)$$

где постоянная γ равна:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad (6)$$

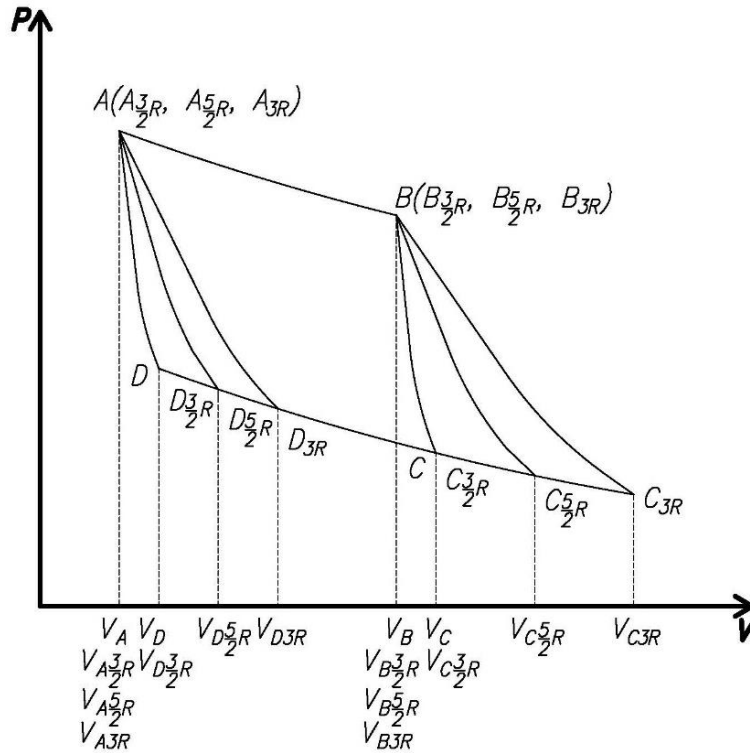


Рис. 1. Цикл Карно с рабочим телом идеальный газ в координатах давление – объём.¹

В этом случае, в свою очередь, C_p – молярная теплоёмкость идеального газа при постоянном давлении.

Известно [18, с. 85], что для идеального газа справедливо следующее равенство:

$$C_p - C_v = R \quad (7)$$

Компиляция последних двух соотношений позволяет констатировать, что:

$$\gamma - 1 = \frac{R}{C_v} \quad (8)$$

Очевидно, что в любой точке кривой $B - C$, где развиваются наши события, будет выполняться уравнение адиабаты, описывающее её поведение [5, с. 85], которое легко приводится к следующему виду:

$$PV^\gamma = P_B V_B^\gamma = P_C V_C^\gamma \quad (9)$$

Как мы уже установили ранее, единственным источником энергии в адиабатическом процессе, которая трансформируется в работу, является внутренняя энергия идеального газа изменение которой определяется следующим соотношением [20, с. 42]:

$$-\Delta U_{BC} = C_v(T_A - T_C) \quad (10)$$

Соответственно, работа, произведённая на этом участке адиабаты $B - C$ в этом случае будет равна:

$$A_{BC} = C_v(T_A - T_C). \quad (11)$$

Компиляция уравнений (5) и (11) и позволяет записать:

$$C_v(T_A - T_C) = \frac{P_C V_C - P_B V_B}{1 - \gamma}. \quad (12)$$

Это соотношение, в свою очередь, с учётом равенства (7) легко приводится к следующему виду:

$$P_C V_C = P_B V_B - R(T_A - T_C). \quad (13)$$

Из последнего уравнения с учётом формулы (9) после несложных алгебраических преобразований получаем:

$$V_C^{1-\gamma} = V_B^{1-\gamma} - \frac{R(T_A - T_C)}{P_B V_B^\gamma}. \quad (14)$$

¹ Appendix 1

Очевидно, что в точке B , как и в любой другой точке изотермы $A - B$ выполняется термическое уравнение состояния идеального газа, которое в этом случае выглядит следующим образом:

$$P_B = \frac{RT_A}{V_B}. \quad (15)$$

Подстановка величины P_B из предыдущего соотношения, в уравнение (14) после несложных алгебраических преобразований, позволяют записать:

$$V_C^{1-\gamma} = V_B^{1-\gamma} \frac{T_C}{T_A} \quad (16)$$

Из последнего равенства получаем:

$$\left(\frac{V_B}{V_C}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_C}{T_A} \quad (17)$$

Выразим величину V_C из предыдущего уравнения через другие переменные, имеющиеся в нём:

$$V_C = \frac{V_B}{\sqrt[\gamma-1]{\frac{T_C}{T_A}}} \quad (18)$$

Подстановка в последнее соотношение значения величины $\gamma - 1$ из соотношения (8) позволяет записать искомое нами значение V_C в наиболее удобном для последующего анализа виде:

$$V_C = \frac{V_B}{\sqrt[\frac{R}{C_V}]{\frac{T_C}{T_A}}} \quad (19)$$

Следовательно, можно утверждать, что нами получена формула, из которой можно определить объём рабочего цилиндра тепловой машины Карно, ответственный за протекание адиабатического процесса (правой адиабаты) как функцию теплоёмкости идеального газа, например, при постоянстве прочих параметров. Вычитание из правой и левой части последнего равенства значения V_B делает возможным определение

величины V_{BC} , характеризующей изменение объёма рабочего цилиндра в процессе прохождения правой адиабаты цикла Карно, как функции молярной теплоёмкости идеального газа при постоянном объёме C_V . Проведя эту операцию, получаем:

$$V_{BC} = \frac{V_B}{\sqrt[\frac{R}{C_V}]{\frac{T_C}{T_A}}} - V_B \quad (20)$$

Упрощение последней формулы позволяет окончательно записать для V_{BC} следующее соотношение:

$$V_{BC} = V_B \left(\frac{1}{\sqrt[\frac{R}{C_V}]{\frac{T_C}{T_A}}} - 1 \right) \quad (21)$$

Резюмируя сказанное, можно утверждать, что нами получена формула, позволяющая определить изменение объёма части рабочего цилиндра тепловой машины Карно, ответственного за протекание адиабатического процесса на участке $B - C$, как функцию молярной теплоёмкости C_V идеального газа для правой адиабаты, в том числе при постоянстве прочих параметров. Отметим, что последнее соотношение является одним из двух слагаемых, характеризующих общее изменение объёма рабочего цилиндра на участке $A - B - C$, которое можно представить, например, следующей формулой:

$$V_{ABC} = \frac{V_B}{\sqrt[\frac{R}{C_V}]{\frac{T_C}{T_A}}} - V_A \quad (22)$$

Таким образом, и на участке цикла Карно $C - D - A$, или точнее на обратном ему участке $A - D - C$, на котором происходит изменение объёма V_{ADC} , в силу того, что мы рассматриваем объём термодинамической системы, который, как известно, является функцией её состояния, и, следовательно, не зависит от пути перехода системы из точки A в точку C , то изменение его величины будет также определяться правой частью предыдущей формулы, иными словами, можно записать:

$$V_{ADC} = \frac{V_B}{\frac{R}{C_V} \sqrt{\frac{T_C}{T_A}}} - V_A \quad (23)$$

При этом необходимо уточнить, что из последних двух формул совсем не следует равенство изменения объёмов соответствующих адиабат и изотерм цикла Карно. Речь в данном случае идёт исключительно о суммарном равенстве этих изменений объёма, имеющих место соответственно на участках цикла $A - B - C$ и $A - D - C$.

Резюмируя сказанное, следует отметить, что обратный изотермический переход идеального газа $C - D$ и соответственно адиабатический переход $D - A$ ни коим образом не оказывают влияние на рабочий объём цилиндра тепловой машины Карно, иными словами их (эти переходы) можно не учитывать при анализе величины V_{ABC} .

ТЕПЛОВАЯ МАШИНА ФИЛИПСА И ЗАВИСИМОСТЬ ЕЁ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ ТЕПЛОЁМКОСТИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Достаточно подробный анализ работы цикла Филипса с рабочим телом «идеальный газ» можно найти, например, в монографии Д. Эверета [21, с. 259–263]. Там же приведён рисунок, описывающий соответствующий цикл $a - b - c - d$ в координатах давление – объём.

Несколько модернизируем данный график и представим его на рис. 2 под названием «Цикл Филипса с рабочим телом идеальный газ в координатах давление – объём». Примем, как и ранее, без ограничения общности, что в системе находится один моль идеального газа. Обозначим объёмы, соответствующие началу и концу верхних и нижних изотерм цикла Филипса для идеального газа V_a и V_b , V_c и V_d . При этом очевидно, исходя из понятия цикл Филипса и геометрии рис. 2, что $V_a = V_d$ и $V_b = V_c$. После сделанных вводных замечаний перейдём к непосредственному анализу

работы тепловой машины Филипса с идеальным газом в качестве рабочего тела.

Такт 1. Изотермические переходы при температуре T_A .

Идеальный газ. Переход $a - b$.

В этом случае, в силу эквивалентности изотермических процессов, протекающих в циклах Карно и Филипса можно воспользоваться формулами из раздела 3.1 данной работы, подставив, в них индексы, принятые нами для цикла Филипса. В этом случае для изменения объёма на участке $a - b$ цикла Филипса, получаем:

$$V_{ab} = V_a (e^{\frac{Q_{ab}}{RT_A}} - 1) \quad (24)$$

Отметим, что в правой части последней формулы ни один из параметров не зависит от теплоёмкости рабочего тела (идеального газа), следовательно, и величина V_{ab} не зависит от молярной теплоёмкости идеального газа при постоянном объёме C_V .

Такт 2. Изохорное охлаждение идеального газа.

Идеальный газ. Переход $b - c$.

В этом случае в соответствии с Д. Эверетом [9, с. 261–262], сторонняя работа отсутствует, т. е. $A_{bc} = 0$. Теплообменник, находящийся внутри машины Филипса запасает тепло в количестве $C_V(T_A - T_C)$, что фактически означает потерю тепла идеальным газом в количестве Q_{bc} , равное следующей величине:

$$Q_{ab} = -1C_V(T_A - T_C) \quad (25)$$

где «1» означает, как мы и договорились ранее, что в системе находится один моль идеального газа. В последующих формулах для их упрощения эта единица приводиться не будет.

В то же время следует отметить, что теплообмен машины Филипса с внешней средой отсутствует (теплообменник находится внутри рабочего цилиндра).

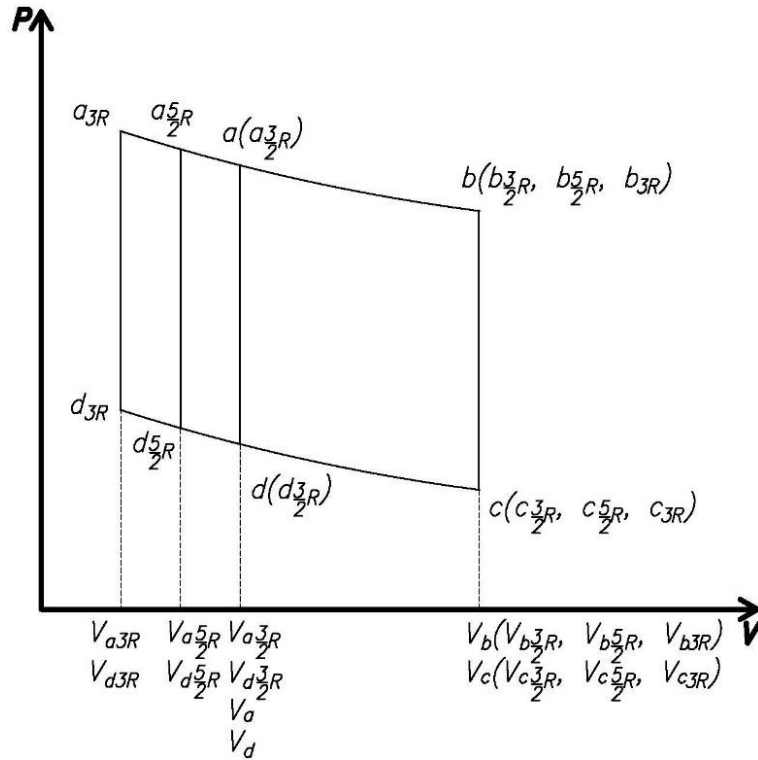


Рис. 2. Цикл Филиппса с рабочим телом идеальный газ в координатах давление – объём. ²

Примем, что удельная теплоёмкость металла, например, меди из которого изготовлен теплообменник будет равна C_{Cu} , тогда при необходимости поглощения им тепла в количестве Q_{bc} , при принятых нами условиях, т. е. при нагревании его от температуры T_C до температуры T_A нам потребуется медный теплообменник весом выраженным, например, в килограммах M_{Cu} , величина которого определяется следующей формулой:

$$M_{Cu} = -\frac{Q_{bc}}{C_{Cu}(T_A - T_C)} \quad (26)$$

После подстановки в последнюю формулу значения величины Q_{bc} , получаем:

$$M_{Cu} = \frac{C_V}{C_{Cu}} \quad (27)$$

В силу того, что вес теплообменника линейно растёт с увеличением молярной теплоёмкости при постоянном объёме рабочего тела (идеального газа), то очевидно, что для снижения металлоёмкости, а значит и объёма рабочего цилиндра тепловой машины Филиппса, при прочих равных условиях,

нужно выбирать рабочее тело с минимальной теплоёмкостью C_V .

Следует отметить, что изотермический переход идеального газа $c-d$ и соответственно процесс его нагрева $d-a$ ни коим образом не оказывают влияние на вес теплообменника тепловой машины Филиппса, так как являются процессами обратными по отношению к переходам $a-b$ и $b-c$. Иными словами их можно не учитывать при анализе величины веса меди M_{Cu} , а, следовательно, и геометрических параметров рабочего цилиндра машины Филиппса.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ВЕРИФИКАЦИЯ

Вычисления, проведённые в двух предыдущих подразделах данной работы в связи с поставленной в ней целью, приводят к вполне однозначному результату, а именно: снижение молярной теплоёмкости при постоянном объёме рабочего тела (идеальный газ) в тепловых машинах Филиппса и Карно однозначно, хотя и по несколько разным законам, способствует уменьшению их металлоёмкости и геометрических размеров. К сожалению, «пионерский», по всей видимости, характер данной работы не позволил авторам найти ни отечественные ни западные источники, для сравнительного их

² Appendix 1

анализа с предлагаемой публикацией. Вместе с тем, следует отметить, что полученный нами вывод никоим образом не противоречит теореме Карно. Действительно, в соответствии с И. Пригожиным [18, с. 81] «Карно показал, что обратимый циклический тепловой двигатель, должен производить максимальную работу (движущую силу) ...». В дальнейшем он [18, с. 81] сообщает: «Если бы какой-нибудь тепловой двигатель мог совершить большее количество работы, чем обратимый циклический двигатель, то можно было бы совершать бесконечное количество работы. Сначала с помощью более эффективного двигателя следовало передать теплоту от горячего резервуара к холодному, затем с помощью обратимого теплового двигателя возратить тоже количество теплоты в горячий резервуар. Поскольку прямой процесс даёт большее количество работы, чем требуется для совершения обратного процесса, в итоге получается выигрыш в работе. ...Карно утверждал, что это невозможно».

В свою очередь наши выводы касаются исключительно вопросов, связанных с геометрическими характеристиками и металлоёмкостью тепловых машин Филиппа и Карно (рабочее тело «идеальный газ») и поэтому не входят в сферу регулирования отношений, определяемых теоремой Карно. Вместе с тем формулы, приведённые в двух предыдущих подразделах данной работы, относящиеся к изменению объёма рабочего цилиндра двигателя Карно и веса теплообменника двигателя Филиппа, требуют некоторого пояснения, как с целью придания им большей наглядности, так и с целью верификации полученных результатов. В связи с этим на начальном этапе рассмотрим величину V_{ABC} , определяемую соотношением (22), которое характеризует изменение общего объёма рабочего цилиндра тепловой машины Карно. Отметим, что, как это мы уже выяснили ранее оно разбивается на две составные части, а именно – изменение объёма $V_{AB} = V_A (e^{\frac{Q_{AB}}{RT_A}} - 1)$ имеющее место при протекании изотермического процесса (его величина не зависит от теплоёмкости рабочего тела C_V) и изменение объёма V_{BC} (формула (21)), имеющее место при протекании адиабатического процесса (его

величина зависит от теплоёмкости рабочего тела C_V).

Известно [22, с. 57; 23, 24], что молярная теплоёмкость идеального газа C_V является функцией конфигурации его молекул и при увеличении степеней свободы в них она меняется в следующем порядке: одноатомные молекулы $C_V = \frac{3}{2}R$; двухатомные молекулы $C_V = \frac{5}{2}R$; многоатомные молекулы $C_V = 3R$. В силу этого имеет смысл рассмотреть изменение величины V_{BC} , при соответствующем изменении C_V идеального газа, что позволяет нам переписать формулу (21), проиндексировав в ней величины V_{BC} в соответствии с изменением теплоёмкости идеального газа, в следующем виде:

$$V_{BC\frac{3}{2}R} = V_B \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\frac{T_C}{T_A}}} - 1 \right) \quad (28)$$

$$V_{BC\frac{5}{2}R} = V_B \left(\frac{1}{\sqrt[5]{\frac{T_C}{T_A}}} - 1 \right) \quad (29)$$

$$V_{BC3R} = V_B \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\frac{T_C}{T_A}}} - 1 \right) \quad (30)$$

где $V_{BC\frac{3}{2}R}$, $V_{BC\frac{5}{2}R}$, V_{BC3R} – это изменение объёма рабочей части цилиндра тепловой машины Карно, ответственного за адиабатический процесс $b - c$ соответственно при молярных теплоёмкостях идеального газа при постоянном объёме C_V , равных $\frac{3}{2}R$, $\frac{5}{2}R$ и $3R$.

С целью упрощения численных вычислений без ограничения общности примем, что: $V_B = 0.001 \text{ м}^3$, $V_A = 0.5 V_B$, $T_C = 300 \text{ К}$, а $T_A = 600 \text{ К}$. Тогда при подстановке соответствующих величин в предыдущие три формулы и проведении вычислений получаем, что:

$$V_{BC\frac{3}{2}R} \approx 0.00183 \text{ м}^3; V_{BC\frac{5}{2}R} \approx 0.00465 \text{ м}^3;$$

$$V_{BC3R} \approx 0.00700 \text{ м}^3.$$

Сравнение полученных результатов друг с другом показывает резкий рост рабочего объёма цилиндра, ответственного за адиабатический процесс (практически геометрическая прогрессия), которое наблюдается при рассмотренном увеличении молярной теплоёмкости идеального газа при постоянном объёме C_v .

Таким образом, можно констатировать, что указанное ранее снижение молярной теплоёмкости идеального газа способствует уменьшению в несколько раз объёма той части цилиндра машины Карно, которая необходима для осуществления адиабатического процесса, что влечёт за собой и соответствующее снижение металлоёмкости и габаритов данного двигателя.

Проведённые расчёты и выводы, сделанные в отношении тепловой машины Карно, качественно иллюстрируются рис. 1.

Проведём аналогичные вычисления и для цикла Филиппса.

В этом случае адиабатический процесс отсутствует, а для изменения температуры рабочего тела используется «встроенный теплообменник» – металлическая сетка.

Таким образом изменение теплоёмкости идеального газа в рассматриваемой системе оказывает влияние исключительно на вес этой сетки, который непосредственно связан и с практически эквивалентным изменением её объёма, а так как она находится в рабочем цилиндре, то и с соответствующим изменением объёма цилиндра.

Для оценки этого влияния воспользуемся полученной нами ранее формулой (27). Кроме того, примем во внимание, что удельная теплоёмкость материала (медь) из которого изготовлен теплообменник $C_{Cu} = 381 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, тогда вес металлической сетки, из которой он изготовлен $M_{Cu\frac{3}{2}}$, $M_{Cu\frac{5}{2}}$ и M_{Cu3} в зависимости от соответствующей молярной теплоёмкости при постоянном объёме идеального газа $\frac{3}{2}R$, $\frac{5}{2}R$ и $3R$ будет определяться следующими соотношениями:

$$M_{Cu\frac{3}{2}} = \frac{\frac{3}{2}R}{C_m} = \frac{\frac{3}{2} \cdot 8.319}{381} = 0.0327 \text{ [кг]} \quad (31)$$

$$M_{Cu\frac{5}{2}} = \frac{\frac{5}{2}R}{C_m} = \frac{\frac{5}{2} \cdot 8.319}{381} = 0.0545 \text{ [кг]} \quad (32)$$

$$M_{Cu3} = \frac{3R}{C_m} = \frac{3 \cdot 8.319}{381} = 0.0653 \text{ [кг]} \quad (33)$$

Очевидно, что подстановка в последние три уравнения численных значений $R \approx 8.31 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ и $C_{Cu} = 381 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$ позволяет получить вес медной сетки в килограммах.

Проведённые расчёты и выводы, сделанные в отношении тепловой машины Филиппса, качественно иллюстрируются рис. 2.

Исследования, проведённые в данной работе и ориентированные, прежде всего, на изучение тепловых машин Филиппса и Карно, которые являются моделями различных реальных тепловых машин, позволяют сделать выводы, представленные ниже.

ВЫВОДЫ

1. При снижении молярной теплоёмкости при постоянном объёме рабочего тела (идеального газа) тепловой машины Карно работающей как по прямому, так и по обратному циклу, наблюдается резкое близкое к экспоненциальному снижение объёма части её рабочего цилиндра, ответственного за адиабатический процесс с соответствующим уменьшением её металлоёмкости.

2. При снижении молярной теплоёмкости при постоянном объёме рабочего тела (идеального газа) тепловой машины Филиппса работающей как по прямому, так и по обратному цикл, наблюдается практически линейное снижение металлоёмкости теплообменника рабочего цилиндра с соответствующим уменьшением его объёма, а, следовательно, и объёма рабочего цилиндра тепловой машины, что также может быть эффективно в работе [25].

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. The Carnot cycle with a working fluid is an ideal gas in the pressure – volume coordinates.

²**Fig. 2.** The Phillips cycle with a working fluid ideal gas in pressure – volume coordinates.

Литература (References)

- [1] Sergeyev, V., Anikina, I., Kalmykov, K., Naletov, I. Efficiency of using heat pumps with various refrigerants in real steam turbine power units with PT-80 and T-250 turbines, E3S Web of Conferences Volume 140, 18 December 2019, art. no. 10001.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914010001>
- [2] Treshcheva, M., Treshchev, D., Anikina, I., Skulkin, S., The potential for reducing TPP water consumption through the use of heat pumps, E3S Web of Conferences Volume 140, 18 December 2019, art. no. 11001.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914011001>
- [3] Anikina, I., Suslov, V., Influence of heat pumps inclusion in deaeration scheme of heating network make-up water on the operating modes of the TPP, MATEC Web of Conferences, Vol. 245, 5 December 2018, art. no. 15004.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201824515004>
- [4] Anikina, I.D., Sergeyev, V.V., Amosov, N.T., Luchko, M.G., Use of heat pumps in turbogenerator hydrogen cooling systems at thermal power plant, (2017) International Journal of Hydrogen Energy, 42 (1), pp. 636-642.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.256>
- [5] Markus Büchler, David Joos. Wechselstromkorrosion an kathodisch geschützten Rohrleitungen. 3R International, 2016, № 6, p. 46–52.
- [6] Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Vintsarevich A.V., Pavlov A.V., Nalyotov I.D. Gradient heat flux measurement as monitoring method for the diesel engine. (2017) Journal of Physics: Conference Series, 891 (1), art. no. 012096.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012096>
- [7] Tkachenko S.Y., Pishenina N.V., Rumiantseva T.Yu. Analysis of the factors of materials output ratio reduction and energy efficiency incensement of biogas unit. Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute. 2010. № 6 (93). P. 36–42.
- [8] Abbas A.Ja., Nikiforova T.D., Shliakhov K.V., Sopilniak A.M. The effect of the seismicity of the construction site on the material consumption of a multi-story building. Bulletin of the Pridneprovskaya state Academy of construction and architecture. 2019. № 6 (259 – 260). P. 10–17.
- [9] Tsyrikhova Z.V. Logical approach as a means of cutting down the material capacity of a product and growing economical efficiency of industry production. Bulletin of the North Ossetian state University named after K. L. Khetagurov. 2009. № 1. P. 88–92.
- [10] Krivtsov A.I., Chizhova I.A. Forecast of mineral base (mb) use and development on the basis of analysis of metal consumption in energy minerals production. Ores and metals. 1997. № 4. P.10–18.
- [11] Ibrahim F.S.A., Kuznetsov Yu.N. Evolution and genetic forecasting of multispindle automatic lathe development. Bulletin of Kherson national technical University. 2016. № 2 (57). P. 17–20.
- [12] Lagutkin M.G., Nekalin Z.E., Seleznev G.M. Identification of rational geometrical sizes of cylindrical vessels with reinforcing rings loaded by the external pressure. Work safety in industry. 2011. № 7. P. 36–41.
- [13] Sargaeva N.P., Sargaev P.M. The synergy of structural units and ideal quantum gas – condensate reversible transitions of liquid ethane. Proceedings of the Herzen Russian state pedagogical University. 2011. № 138. P. 65–76.
- [14] Filistov E.A. Modification of the numerical code for gas-dynamical flows in cylindrical coordinates. Bulletin of the peoples' friendship University of Russia. Series: Mathematics, computer science, physics. 2014. № 1. P. 92–98.
- [15] Sargaeva N.P., Sargaev P.M. The bec-quantum gas equilibrium and the structure of H₂O liquid. Proceedings of the Herzen Russian state pedagogical University. 2011. № 141. P. 43–54.
- [16] Kalytka V.A., Bashirov A.V., Yerbol A., Abdigapar M.M. Generalized mathematical model the free harmonic oscillations. Current scientific research in the modern world. 2019. № 5–1 (49). P. 134–139.
- [17] Levin V. The research of thermal capacity of submicrocrystalline powder materials on the basis of nickel aluminide. Izvestiya Moscow state technical University MAMI. 2007. № 2 (4). P. 177–182.
- [18] Prigozhin I., Kondepudi D. Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures: monograph / I. Prigozhin, D. Kondepudi // Moscow: Mir, 2002. – 461 P.
- [19] Leontovich M. Vvedenie v termodinamiku [Introduction to thermodynamics]. State publishing house of technical and theoretical literature, Moscow-Leningrad, 1952. 199 p.
- [20] Nikolaev L. Physical chemistry: monography / L. Nikolaev // M.: "Higher school", 1979. – 371 p.
- [21] Everett D. Introduction to chemical thermodynamics: monograph / D. Everett // Moscow: publishing house of foreign literature, 1963. – 279 p.
- [22] Karapetyants M.H. Chimicheskaya termodinamika [Chemical thermodynamics]. State scientific and technical publishing house of chemical literature, Moscow-Leningrad, 1953. 611 p.
- [23] Izmailov N.A. Elektrokhimiya rastvorov [Electrochemistry of solutions]. Chemistry, Moscow, 1976. 488 p.

[24] Glazov V.M. Osnovy fizicheskoy khimii [Fundamentals of physical chemistry]. Higher school, Moscow, 1981. 461 p.

[25] Dobretsov, R., Gubachev, M., Naletov, I. and Vasiliev, A. On the way to driverless road-train: Digital technologies in modeling of movement, calculation and design of a road-train with hybrid

propulsion unit. IV International Scientific Conference "The Convergence of Digital and Physical Worlds: Technological, Economic and Social Challenges" (CC-TEESC2018). 2018. 1-9. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184400030> (accessed 05.04.2020).

Сведения об авторах.



Киселев Владимир Геннадьевич, д.т.н., профессор, СПбПУ Петра Великого. Научные интересы: коррозия металлов и защита от неё, химическая термодинамика.
E-mail: kis_vg@mail.ru



КукOLEV Максим Игоревич, д.т.н., профессор, СПбПУ Петра Великого. Научные интересы: энергетика, коррозия металлов и защита от неё, химическая термодинамика.
E-mail: maksim.kukolev@spbstu.ru



Калютик Александр Антонович, к.т.н., доцент, СПбПУ Петра Великого. Научные интересы: атомная энергетика, коррозия металлов и защита от неё.
E-mail: kalyutik@yandex.ru