

УДК 62-84

«Карнотизация» рабочих циклов тепловых двигателей¹

Степанов Г.Ю.

Москва, Россия

В статье изложены результаты теоретического анализа возможностей приближения реальных термодинамических циклов к обратимому циклу Карно. Рассмотрены характерные примеры: регенеративный цикл, цикл Уварова и парогазовый цикл. Показаны области применения «карнотизации» циклов. Статья предназначена для преподавателей и студентов технических ВУЗов.

Ключевые слова: термодинамический цикл, цикл Карно, коэффициент полезного действия (КПД), карнотизация.

Как известно, наивысший термический КПД (η_c), зависящий только от температур нагревателя $T_{\max}$ и охладителя $T_{\min}$, имеет цикл Карно (1824 г.), который состоит из двух изотерм (ac_1 , c_2) и двух адиабат (c_1c , ca), рис.1:

$$\eta_c = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}}.$$

При $T_{\min}=288\text{K}$ и $T_{\max}=1000$ и 3000K , КПД цикла Карно будет соответственно 0,710 и 0,905 (удельный расход топлива $g_e = 89$ и 70 г/л.с./ч).

В реальных двигателях цикл Карно неосуществим ввиду трудностей выполнения изотермических сжатия и расширения, а также необходимости очень больших изменений давлений $P = \frac{P_{\max}}{P_{\min}}$ и объемов $\varepsilon = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$ рабочего тела для получения приемлемой работы (площади цикла) $L_c = (T_{\max} - T_{\min}) \cdot G \cdot \Delta S$:

$$P = \left(\frac{T_{\max}}{T_{\min}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \exp \left(\frac{L_c/G}{R(T_{\max} - T_{\min})} \right), \quad \varepsilon = P \frac{T_{\min}}{T_{\max}}.$$

¹ Согласие на публикацию рукописи статьи дано ее правообладателем и автором книги «Об ученом «танкисте-астронавте» из династии Степановых. Сборник очерков и Воспоминаний» / Авторы-составители: М.М. Буренков, В.В. Соломай, Н.И. Троицкий. – М.: МЕГАЛИОН, 2017. – 320 с.

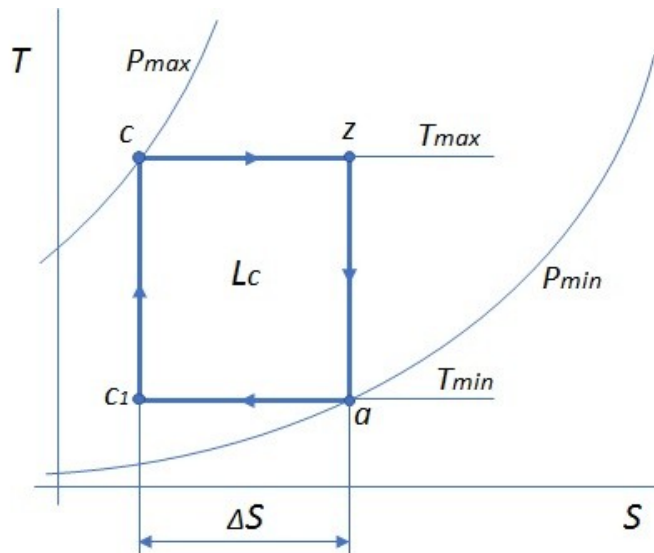


Рис. 1. Цикл Карно.

При указанных выше значениях T_{min} и T_{max} , показателе адиабаты $\kappa = 1,4$ и умеренном значении удельной работы $L_c/G = 100$ кДж/кг (характерном для низкотемпературных автомобильных ГТД простого цикла) получаем $\Pi = 130$ и 4200 , $\varepsilon = 40$ и 400 .

Совершенствование рабочих циклов реальных тепловых двигателей производят приближением их к циклу Карно, что и называют «карнотизацией».

КПД и работа цикла, состоящего из двух изотерм и двух изобар, изображенного сплошными линиями на рис. 2, будут в точности равны КПД и работе цикла Карно с теми же температурами T_{min} и T_{max} (пунктир), если применить идеальную регенерацию тепла между изобарами:

$$Q_{ba} = C_p \cdot G \cdot (T_a - T_b) = -Q_{cz} = C_p \cdot G \cdot (T_z - T_c).$$

То есть степень регенерации $\sigma = (T_r - T_c) / (T_a - T_b) = 1$, $T_r = T_z = T_b = T_{max}$, $T_a = T_c = T_{min}$.

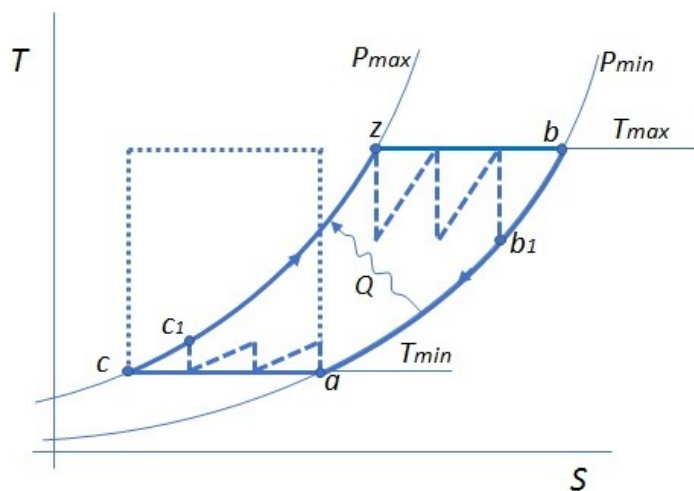


Рис. 2. Регенеративный цикл. Пунктиром обозначены ступенчатые процессы сжатия воздуха и расширения горячих газов.

Приблизиться к такому циклу можно в ГТД со ступенчатыми процессами сжатия $ac1$ и расширения $zb1$, то есть с промежуточными охлаждениями воздуха между несколькими

компрессорами и его нагревом между несколькими турбинами (штриховые линии). По такому циклу с большой степенью регенерации в 50-х годах прошлого века были выполнены открытые и замкнутые стационарные газотурбинные установки швейцарских фирм Браун-Бовери (Brown Boveri) и Эшер-Висс (Escher Wyss). Для транспортных ГТД многоступенчатые процессы сжатия и расширения практически не осуществимы. Однако уже двухступенчатые процессы дают значительный эффект, что было подтверждено на автомобильном ГТД фирмы «Форд».

В цикле Уварова² (рис. 3) многоступенчатое сжатие заканчивается высоким адиабатическим сжатием, и также многоступенчатое расширение – высоким адиабатическим. Этот цикл непосредственно приближен к циклу Карно (пунктир), «обрезанному» по двум изобарам наибольшего и наименьшего давлений. Регенерация тепла невозможна, так как $T_c > T_b$. При одинаковом с предшествующим циклом с предшествующим циклом изотермическим сжатием цикл Уварова дает несколько большую удельную работу и соответственно позволяет получить большую мощность единичного агрегата.

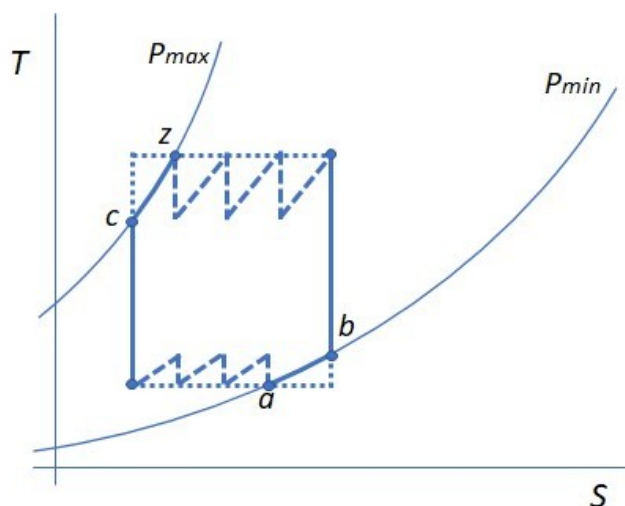


Рис. 3. Цикл Уварова. Пунктиром выделены многоступенчатые процессы сжатия и расширения.

Еще один способ карнотизации – использование парогазового цикла (рис. 4). В нем отработавшие газы нагревают жидкость в котле и затем ее пар в пароперегревателе. Пар адиабатически расширяется в турбине ($z1b1$) до состояния насыщения, после чего при постоянных температуре и давлении конденсируется в жидкость. Парогазовый цикл по сути дела осуществляет утилизации в работу части тепла, отводимого в охладителе (ba) газового цикла. Последний может быть, как с лопаточными, так и с поршневыми машинами.

Поршневые двигатели внутреннего сгорания какой-либо другой карнотизации не поддаются. Однако теоретические циклы поршневых газовых двигателей внешнего сгорания – двигателей Стирлинга с регенерацией – имеют вид циклов, показанных на рис. 2 и 3, с заменой изобар cz и ba на изохоры. В этих двигателях реализована карнотизация цикла и

² Владимир Васильевич Уваров (4 августа 1899 - 1977) - выдающийся советский учёный-теплотехник, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР. Организовал в МВТУ имени Н.Э. Баумана кафедру газовых турбин, которой руководил до конца жизни. Создал школу российских инженеров и учёных-газотурбинистов.

благодаря этому, несмотря на низкую максимальную температуру, достигнуты довольно высокие КПД.

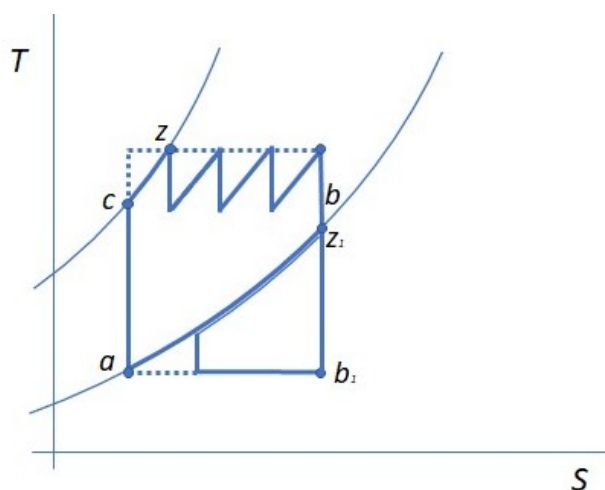


Рис.4. Парогазовый цикл.

АВТОР

Степанов Георгий Юрьевич (01.08.1922 – 15.10.2005), доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, почетный член Российской академии естественных наук (РАЕН), действительный член Международной Астронавтической академии, главный научный сотрудник НИИ механики МГУ.

Machines & Plants Design & Exploiting

Electronic journal
International Public Organization
"Integration strategy"
<http://maplants-journal.ru>

//Machines and Plants: Design and Exploiting.
2023. № 3. pp. 34 – 38.

DOI:

Received: 09.08.2023

Accepted for publication: 18.08.2023

© International Public Organization "Integration
strategy"

"Carnotization" of working cycles of heat engines³

Georgy U. Stepanov

Moscow, Russian Federation

The article presents the results of a theoretical analysis of the possibilities of approximation of real thermodynamic cycles to the reversible Carnot cycle. Typical examples are considered: regenerative cycle, Uvarov cycle and steam-gas cycle. The areas of application of "carnotization" of cycles are shown. The article is intended for teachers and students of technical universities.

Keywords: thermodynamic cycle, Carnot cycle, efficiency (efficiency), carnotization.

AUTHOR

Stepanov Georgy Yuryevich (01.08.1922 – 15.10.2005), Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of the RSFSR, honorary member of the Russian Academy of Natural Sciences (RAS), full member of the International Astronautical Academy, chief Researcher of the Institute of Mechanics of Moscow State University.

³ Consent to the publication of the manuscript of the article was given by the copyright holder and the author of the book "About the scientist "tank-cosmonaut" from the Stepanov dynasty. Collection of essays and memoirs" / Authors-compilers: [M.M. Burenkov], V.V. Solomai, [N.I. Troitsky]. – M.: MEGALION, 2017. – 320 p.