

**Б. А. ТРОШЕНЬКИН, В. Б. ТРОШЕНЬКИН**

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК, РАБОТАЮЩИХ ПО ЗАМКНУТОМУ ЦИКЛУ

**АННОТАЦИЯ** Рассмотрены основные этапы «дизелизации» газотурбинных установок (ГТУ), зафиксированные в патентной литературе. «Дизелизация» основана на принципе независимости давления, развиваемого компрессором, от расхода газа. Выполнение ряда технологических и конструктивных усовершенствований в ГТУ, даёт возможность увеличить давление газа, подаваемого к источнику тепла, до 30 МПа. Последнее обстоятельство позволяет повысить КПД ГТУ до 70 %. Тем не менее, ограничения со стороны прочностных свойств материалов не позволяют использовать часть располагаемого температурного напора для выработки электроэнергии. Данное положение можно исправить, применив для изготовления турбин и компрессоров углеродные материалы и, в частности, фуллерены. Опытным путём установлено, что микротрос из нанотрубок фуллерена толщиной в человеческий волос способен выдерживать грузы в десятки тонн. При высоких температурах прочностные свойства углеродных материалов изменяются незначительно. В докладе дан анализ замкнутого цикла, рабочим телом в котором приняты гелий и аргон. Эффективность разработанного высокотемпературного цикла позволяет приблизиться к эффективности цикла Карно.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, дизелизация, КПД, фуллерены, замкнутый цикл, цикл Карно.

**B. TROSHENKIN, V. TROSHENKIN**

### INCREASING THE EFFICIENCY OF CLOSED-CYCLE GAS TURBINE POWER PLANTS

**ABSTRACT** Consideration is given to the main stages of "dieselization" of gas turbine power plants (GTP) given in the patent literature. The "dieselization" is based on the principle that the pressure developed by the compressor is independent of the gas flow. Some technological and structural improvements in the GTP allow us to increase the gas pressure supplied to the heat source to 30 MPa. The latter circumstance will allow us to increase the GTP efficiency to 70 %. However, the restrictions related to the material strength properties prevent us from using a portion of available temperature difference to produce electric power. This situation can be improved by using carbon materials, in particular fullerenes for the building of turbines and compressors. The tests showed that the microcable made of fullerene nanotubes that have a human hair thickness can carry tens of tons cargo. At high temperatures the strength properties of carbon materials change insignificantly. In this report the analysis of the closed cycle whose actuating medium is helium and argon has been given. The efficiency of the developed high-temperature cycle allows us to approach the efficiency of Carnot cycle.

**Key words:** gas turbine plant, dieselization, efficiency factor, fullerenes, closed cycle and the Carnot cycle.

#### Введение

Известно, что термический КПД цикла ГТУ с изобарным подводом теплоты является прямой функцией степени повышения давления (в адиабатном процессе) или иначе прямой функцией степени сжатия. Термический КПД определяется по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{(k-1)/k}}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – степень повышения давления при адиабатном сжатии,  $\beta = P_2/P_1$ ;  $P_1$  – начальное давление;  $P_2$  – конечное давление;  $k$  – коэффициент, являющийся отношением теплоёмкости газа в процессах постоянного давления  $C_p$  и постоянного объёма  $C_v$ ,  $k = C_p/C_v$ .

Из приведённой формулы (1) видно, что, повышая давление газов, можно добиться значительного роста КПД.

Такая возможность следует из сравнения цикла двигателя Дизеля с циклом газотурбинной установки при равенстве максимальных темпера-

тур и давлений, а также начальных состояний.

На рис. 1 приведены циклы газотурбинной установки  $abcd$  и двигателя Дизеля  $ABCD$ .

В представленном цикле Дизеля газ сначала сжимается в адиабатном процессе  $AB$ , затем в изобарном процессе  $BC$  получает теплоту и нагревается. Далее происходит расширение газа в адиабатном процессе  $CD$  и отвод тепла от газа в изохорном процессе  $DA$ .

Поскольку цикл газотурбинной установки обладает меньшей среднеинтегральной температурой процесса отвода тепла от газа, то ГТУ будет иметь больший термический КПД.

Но ряд специалистов убеждены, что такое сравнение циклов ГТУ и двигателя Дизеля является чисто теоретическим, так как двигатели Дизеля работают при таких максимальных давлениях и температурах, которые ещё недоступны для газотурбинных установок [1].

Цикл газотурбинной установки со сгоранием при  $P = \text{const}$  иногда называют циклом Брайтона. Этот цикл может быть разомкнутым или замкнутым. В замкнутом цикле количество рабочего тела сохраняют постоянным.

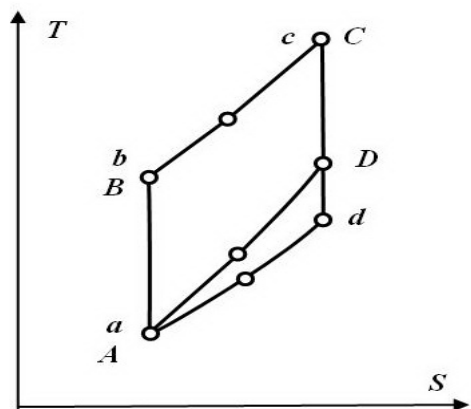


Рис. 1 – Циклы газотурбинной установки и двигателя Дизеля

Выход отработавших газов в атмосферу заменяют изобарным процессом с отводом тепла в холодильник. Тепло подводят к рабочему телу, от внешнего источника тепла. Замкнутый цикл обладает определёнными преимуществами перед разомкнутым циклом. В частности, замкнутый цикл позволяет применять рабочее тело, имеющее максимальное значение показателя адиабаты. Такими рабочими телами, в первую очередь, могут являться одноатомные газы – гелий и аргон. Для одноатомного идеального газа  $k = 1,67$ , тогда как для воздуха  $k = 1,40$ .

Кроме того, если в разомкнутой схеме низким давлением цикла является атмосферное давление, то в замкнутом цикле при той же степени увеличения давления начальное давление может быть выбрано значительно большим, чем атмосферное. Это позволяет вести работу при больших давлениях, что ведёт к значительному уменьшению объёмов газа, проходящих через элементы ГТУ. При этом сокращаются габариты установки, снижаются поверхности нагрева теплообменников и упрощается проблема создания турбин больших мощностей [2].

Значительные успехи в изучении процессов сжатия и расширения газов привели к появлению рациональных конструкций ГТУ. С другой стороны, в последнее время появился ряд материалов, стойких при высоких температурах, применение которых может повысить КПД ГТУ.

### Цель работы

**Определить направление научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по повышению эффективности газотурбинных установок на основе анализа патентов и достижений по материаловедению.**

### Анализ патентных материалов

Судя по ряду патентов, специалистам удалось преодолеть трудности «дизелизации» ГТУ и

резко повысить КПД установок. Установки работают как по замкнутому, так и по разомкнутому циклам [3–6].

Как известно, в типовых ГТУ компрессор и турбина имеют общий вал. Такое конструктивное решение приводит к зависимости давления, развиваемого компрессором, от массового потока сжимаемых газов. «Дизелизация» заключается в **устранения жесткой механической связи между турбиной и компрессором**, масса потоков и давления разделяются. В этом случае компрессор приводится в действие электродвигателем, а турбина вращает генератор, снабжающий электроэнергией компрессор (рис. 2).

Модуль компрессора состоит из двух подсистем (ступеней): высокого и низкого давления. Газотурбинный модуль также имеет подсистемы как высокого, так и низкого давления. В состав установки входят два внешних источника тепла по одному на каждую подсистему, а также один холодильник. Источники тепла могут включать камеры сгорания, геотермические радиаторы, ядерные реакторы или другие виды оборудования для производства тепла. Модульные и структурные компоненты на рис. 2 расположены в соответствии с термическим циклом для замкнутого контура [3].

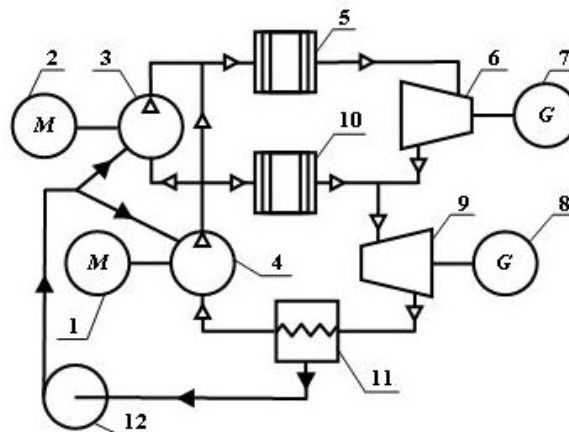


Рис. 2 – Схема газотурбинной установки:  
1, 2 – электродвигатель; 3 – первая ступень компрессора; 4 – вторая ступень компрессора; 5 – первый источник тепла; 6 – первая ступень турбины; 7, 8 – генератор; 9 – вторая ступень турбины; 10 – второй источник тепла, 11 – холодильник; 12 – насос

В контуре циркулирует первичная нейтральная рабочая среда и вторичная среда с фазовыми превращениями. Первичная рабочая среда представляет собой инертный газ, такой, как гелий, аргон или ксенон. Среда с фазовыми превращениями – фреон.

Могут быть другие комбинации жидкостей. Компрессор работает всегда при постоянном и максимально возможном давлении в пределах

20–30 МПа. Если обычные турбины и компрессоры вращаются со скоростью 3 тыс. об/мин, то в рассматриваемой установке скорость вращения составляет 35–50 тыс. об/мин. Подшипники компрессора и турбины расположены на магнитных подвесках.

Наиболее экономичный изотермический процесс сжатия рабочей среды обеспечивают за счёт впрыскивания фреона в компрессорный модуль. Газообразная смесь нагревается от внешнего источника тепла и далее расширяется в газотурбинном модуле в ступенях высокого и низкого давления.

Турбина полностью подчинена требованиям потребителя, её мощность варьируется за счёт подключения второй ступени. При этом часть газов, сжатых в подсистеме компрессора низкого давления, подаются через источник тепла в подсистему турбины низкого давления.

В свою очередь, газы, выходящие из турбины низкого давления, отдают часть тепла в компрессорный модуль изотермически сжатому газу и окончательно охлаждаются в холодильнике, где фреон конденсируется. Далее фреон насосом закачивают в компрессорный модуль.

Установка имеет ряд элементов, не показанных на схеме. В частности, каждая ступень компрессора снабжена двумя роторами. Первый ротор вращается в направлении противоположном вращению второго ротора. Каждый ротор располагает своим электродвигателем.

Ступени турбины также имеют по два ротора со встречным вращением. Каждый ротор приводит во вращение свой электрогенератор.

Вращение роторов в противоположном друг другу направлениях оптимизирует процессы расширения и сжатия газов. На валах роторов установлены счётчики числа оборотов, сведения от которых поступают на процессор (интегратор). Интегратор по специальной программе управляет скоростью вращения роторов с помощью регулируемых клапанов, установленных на газовых трубопроводах.

Помимо этого, ступени компрессора и турбины имеют устройства поворота лопаток роторов в требуемое положение в зависимости от режимов сжатия или расширения газов.

Компрессорный и турбинный модули высокого давления заключены в камерах. Давление в компрессоре и турбине выравнено с давлением в камерах для устранения механических напряжений.

Циркуляция в контуре ГТУ рабочей среды представлена в виде кругового процесса на термодинамической диаграмме в системе координат  $T-S$  (рис. 3) [3]. Автор по ординате даёт температуру в °С, которую можно перевести в термодинамическую температуру по формуле:

$$T = (t + 273) \text{ К} . \quad (2)$$

Изотермическое сжатие рабочей среды соответствует участку кругового процесса 1-2. В этот период жидкий фреон впрыскивается в модуль компрессора. Финальная стадия сжатия газовой смеси изображена на диаграмме в виде пути 2-3. Нагрев смеси проводят изобарическим 3-4 и изотермическим 4-5-6 образом. Газовая смесь расширяется последовательно сначала изотермически 4-5-6, а затем адиабатически 6-7. Далее изобарическое охлаждение 7-8-1 с отводом тепла для нагрева сжимаемого газа в финальной стадии 2-3-4. Рекуперация тепла происходит также как в цикле Ренкина.

Круговой процесс можно рассматривать как комбинированный цикл, состоящий из двух частей. В круговом процессе 1-2-3-4-1 достигается максимальный термический КПД. Тем не менее мощность ГТУ возрастёт, если добавить к первому круговому процессу второй круговой процесс, ограниченный контуром 1-4-5-6-7-8-1. В этом случае замкнутый цикл приближается по своей эффективности к циклу Карно. Автор считает, что введение в замкнутый цикл фреона является стратегическим решением, повышающим КПД установки.

Основные элементы рассмотренной ГТУ взяты автором из его предыдущего изобретения силовой установки, работающей по открытому циклу [4]. При коэффициенте  $\beta$  равном 80 КПД гибридной установки достигает 70 %.

Дальнейшее совершенствование гибридных силовых установок связано с сокращением длины газопроводов и использованием редукторов между компрессором и электродвигателем, а также между газовой турбиной и электрогенератором [5, 6].

Высокий КПД ГТУ позволяет в несколько раз снизить расход топлива и воздуха. Последнее особенно важно для авиации в стратосфере, где воздух разрежен. Ресурс работы двигателя 40 тыс. часов. Двигатель является турбовоздушным, установлен, в частности, на Боингах (сообщение Dr. Marius Angelo Paul на семинаре в ИПМаш им. А. Н. Подгорного НАН Украины 21.08.2006 г.).

### Перспективы применения высокотемпературных циклов

Основной недостаток рассмотренного изобретения заключается в том, что расширение газа в турбинах идёт от температуры 1200 °С. В то время как при сжигании топлива, например, газа, в воздухе развиваются температуры 1900 °С. Следовательно, температурный напор примерно в 700 °С остаётся неиспользованным для производства электроэнергии.

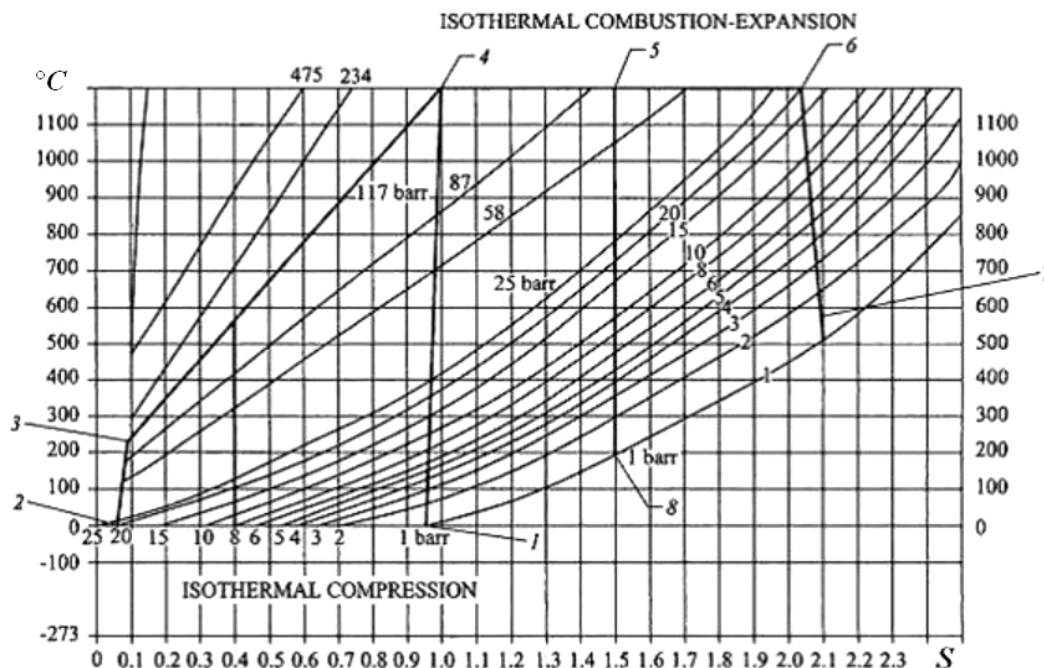


Рис. 3 – Циркуляція робочої середої в контурі ГТУ в виде кругового процесу [3]

Но на пути дальнейшего повышения температуры рабочей среды возникает ряд препятствий. Можно выделить из них два основных: во-первых материал газовых турбин не выдерживает температуры выше 1200 °С, во-вторых, с ростом температуры активизируется процесс образования токсичных соединений, в частности оксидов азота  $\text{NO}_x$ , а при температуре выше 1800 °С – циана  $\text{C}_2\text{N}_2$ .

Вместе с тем недавние достижения в области материаловедения позволяют преодолеть оба этих препятствия.

Так, создание тонких ионно-обменных мембран открывает перспективу производства дешёвого кислорода из воздуха. Мембраны изготавливают как из диоксида циркония, так и из соединений на основе оксидов лантана, стронция, кобальта, железа и т. п. [7, 8].

Применение мембран снижает стоимость производства кислорода по сравнению с получаемым криогенным способом на 40 % [9].

Сжигание топлива в чистом кислороде самым благоприятным образом сказывается на экономических и экологических показателях ТЭС. Вначале остановимся на экологических преимуществах разрабатываемой технологии. Для исключения оксидов азота  $\text{NO}_x$  из продуктов сгорания необходимо, чтобы азот просто не подавался в топку электростанций.

При сжигании мазута и газа в кислороде это условие выполняется полностью. Как известно, в твёрдом топливе содержится незначительное количество азота. При сжигании угля в кислороде количество образующихся оксидов азота не пре-

вышает установленных нормами предельно допустимых концентраций (ПДК).

Другой положительный момент рассматриваемой технологии заключается в том, что продукты сгорания состоят в основном из диоксида углерода и паров воды. Это позволяет без особых затрат на проведение кругового процесса отделить диоксид углерода, ожидить его и закачать в глубинные слои Земли [10, 11].

Для изготовления турбин, работающих при высоких температурах, пригоден материал, сформированный из нитей чистого углерода. В качестве связующего нитей используют также чистый углерод (пироуглерод). Поэтому созданный материал называется углерод-углеродным. Прочностные свойства данного материала с повышением температуры от 20 до 2000 °С изменяются незначительно [12].

В Харьковском физико-техническом институте построен и оснащён необходимым оборудованием специальный научно-производственный комплекс общей площадью около 5000 м<sup>2</sup>, рассчитанный на производство изделий из углерод-углеродного материала не менее 40 тонн в год. В последнее время разработано и в той или иной степени освоено опытное или серийное производство более 30 видов продукции общетехнического назначения.

Созданная технология позволяет получать изделия со следующими характеристиками:

- плотность,  $\rho = 1700\text{--}2000 \text{ кг/м}^3$ ;
- прочность при растяжении: при 20 °С  $\sigma = 120 \text{ МПа}$ ; при 2000 °С  $\sigma = 80 \text{ МПа}$ ;

– коэффициент теплопроводности: при 20 °С  $\lambda = 5-7$  Вт/(м·К); при 1000 °С  $\lambda = 10-15$  Вт/(м·К).

Как видим, плотность углеродного материала примерно в четыре раза ниже плотности стали. Это означает, что при равных температурных условиях ротор турбины, изготовленный из углеродного материала может вращаться со скоростью в четыре раза более высокой, чем ротор, изготовленный из металла. В этом случае механические нагрузки, развиваемые в конструкциях роторов центробежной силой, будут одинаковыми.

Ранее предполагалось, что разработанный материал пригоден для изготовления не только роторов турбин, но и центрифуг. Это предположение было проверено на примере разделения сплава ферросиликоалюминия (ФСА), полученного из углеотходов [13]. Состав сплава ФСА, % вес.: 15–25 Al, 55–60 Si, Fe – остальное.

Вначале по известным диаграммам изучали растворимость углерода в алюмокремниевых сплавах. Установлено, что при 2000 °С чистый кремний растворяет до 5 %, а сплав состава 30 % Si и Al – остальное – до 6 %.

Температура плавления образующихся карбидов SiC – 2730 °С, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> – 2100 °С, Fe<sub>3</sub>C – 1650 °С [14, 15]. Высокая температура плавления карбидов позволяла надеяться, что формируемый ими тонкий слой на внутренней (рабочей) поверхности ротора, может служить надёжным гарнисажем для основного корпуса.

Далее были проведены предварительные лабораторные опыты. Навеску сплава ФСА весом 45 г загружали в графитовый тигель. Тигель разогревали электротокком до плавления сплава ФСА. После чего тигель остужали и разрезали по высоте. Изучение структуры графита показало, что никаких изменений, за исключением тонкого внутреннего слоя, не наблюдалось.

Затем был изготовлен стенд с вертикальным расположением ротора и электродвигателя. Ротор выполнен в двух вариантах. В первом варианте ротор имел внутренний диаметр  $D_i = 80$  мм, внешний –  $D_e = 105$  мм, высота между дном ротора и крышкой  $h = 50$  мм. Геометрические размеры второго ротора:  $D_i = 40$  мм,  $D_e = 50$  мм,  $h = 60$  мм. Первый ротор вмещает 0,34 кг раздробленного ФСА, второй – примерно в два раза меньше. Роторы закрывались крышками. Для этого в верхней части каждого ротора нарезалась внутренняя резьба, а на боковой стенке крышки наружная резьба. После загрузки сплава ФСА крышка плотно закручивалась в корпус ротора.

Установка снабжена медными индукторами, установленными с внешней стороны роторов, и высокочастотным генератором тип ВЧГ-60/044. Оборудование размещалось в бронеканере, в которую под давлением нагнетался аргон.

Во время опытов к индуктору подводился ток напряжением до 8 кВ и частотой 440 кГц. Одновременно в индуктор вводилась и отводилась охлаждающая вода.

В стационарных условиях ротор вначале становился красным, а с достижением температуры 2000 °С принимал белый цвет. Сплав ФСА расплавлялся, но в центре ротора  $D_i = 80$  мм были обнаружены крупинки нерасплавившегося железа. Это явление исчезало в роторе  $D_i = 40$  мм, сплав полностью расплавлялся.

Однако опыты пришлось прекратить в самом начале при запуске установки.

Пироуглерод, заполняющий пространство между углеродными волокнами, оказался недостаточно плотным. В результате жидкий алюминий проник через микропоры на внешнюю поверхность ротора. При высоких оборотах капли алюминия могли, скорее всего, замкнуть ротор на индуктор.

Причиной возникновения микропор могла явиться технология изготовления ротора. Ротор вытачивался на токарном станке из сплошной цилиндрической заготовки. Толщина стенки ротора в 5 мм оказалась слишком малой для такого рода изделий. В связи с этим крайне важно разработать технологию изготовления витых роторов.

В последнее время открыты молекулы углерода C<sub>60</sub>. Молекула содержит 60 атомов углерода и по своему виду похожа на футбольный мяч, поверхность которого составлена из правильных пяти- и шестиугольников. Материал назван фуллереном. Опытным путём установлено, что микротрос из нанотрубок фуллерена толщиной в человеческий волос способен выдерживать грузы в десятки тонн. В 2004 г была синтезирована искусственная плёнка из фуллерена C<sub>60</sub> толщиной в один атом. Плёнку назвали графен.

Как известно, фуллерен получают путём конденсации паров графита. При этом оказалось возможным заменять один атом углерода в шестиграннике, на атом другого элемента, например, бора [16].

В связи с этим можно предположить, что в ближайшее время будет налажено производство многослойных изделий с заданными свойствами. Это обстоятельство открывает возможность создания энергоустановок, работающих по высокотемпературным циклам.

Как уже отмечалось, крайне сложно адаптировать турбоавиационный двигатель к условиям стационарной теплоэнергетики, и, в частности, к установкам, работающим по бинарному циклу [17]. Так, выходящий из последней ступени турбины поток газа с температурой 500 °С может дать в генераторе пар с давлением не более 2,0–3,0 МПа. Хотя сейчас в ряде стран (США, Германия и др.) уже эксплуатируются блоки на давлении

пара 30 МПа при температуре 700–730 °С. КПД таких установок достигает 52 %.

Иное дело если из последней ступени турбины будет выходить газ с температурой 900–1000 °С. Тогда можно получить пар с температурой 700–730 °С.

Применение углеродного материала открывает такую возможность. Расширение газа от температуры 1900–2000 °С до 900–1000 °С материал позволяет производить в газотурбинной установке, а далее следует вырабатывать пар и получать энергию в паровом цикле.

Причём наиболее приемлемыми являются замкнутые циклы, рабочей средой в которых служат нейтральные газы.

С переходом на высокие температуры камеры сгорания или топки также придётся изготавливать из углеродного материала. Во избежание их износа, например при сжигании угля, необходимо применять двухступенчатый процесс получения тепла.

Известно, что при сжигании угля в кислороде при температуре 1500 °С реакции соответствует уравнение



При этом в продуктах реакции выдерживается соотношение

$$CO_2 : CO = 0,5. \quad (4)$$

При температуре выше 1700–1800 °С продукты реакции углерода с кислородом состоят в основном из монооксида углерода [18]. Последнее обстоятельство позволяет устанавливать на потоке газообразных продуктов сгорания угля оборудование из углеродного материала. Далее **монооксид** углерода следует сжигать в топках парогенераторов. После котлов получаемый диоксид углерода необходимо направлять в рекуператоры тепла и затем в конденсационную установку.

В угле имеется ряд примесей, способных корродировать углеродный материал. Для предотвращения этого явления поверхности контакта источника тепла с потоком монооксида углерода желателен покрыть плёнкой тугоплавкого металла. Для этой цели может подойти, например, гафний, тантал или вольфрам.

Представляет интерес узнать примерную величину максимального термического КПД высокотемпературных установок. Вначале уточним КПД ГТУ, а затем паросиловой установки (ПСУ). Для этого обратимся к диаграмме, представленной на рис. 3. Автор изобретения утверждает, что круговой процесс 1-2-3-4-1 достигает максимального термического КПД. Но площадь, ограниченная линией кругового процесса, напоминает площадь треугольника, что примерно в два раза меньше площади, ограниченной циклом Карно. Поэтому цикл 1-2-3-4-1 изначально не может иметь максимального термического КПД.

Как известно, термический КПД цикла Карно находят по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (5)$$

где  $T_1$ ,  $T_2$  – максимальная и минимальная температуры цикла, соответственно, К.

В то время как КПД треугольного цикла рассчитывают по зависимости [19]

$$\eta_t = 1 - 2,3 \frac{T_2}{T_1 - T_2} \lg \frac{T_1}{T_2}. \quad (6)$$

При небольшой разности температур  $T_1$  и  $T_2$  КПД определяют по формуле

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2}. \quad (7)$$

Исходя из этого, можно заключить, что термический КПД ГТУ, работающей по замкнутому циклу, вряд ли превысит  $\eta'_t = 72$  %.

Как уже упоминалось, термический КПД ПСУ с парогенераторами высокого давления не превышает  $\eta''_t = 52$  %.

При сжигании метана в кислороде разовьются температуры превышающие 2000 °С. Часть располагаемого температурного напора будет затрачена в теплообменнике на передачу тепла от газов сгорания к нейтральному газу. Поэтому можно допустить, что нейтральный газ будет расширяться от температуры  $t_1 = 2000$  °С до температуры  $t_2 = 1000$  °С. Таким образом, используемый перепад температур составит  $\Delta t_{ГТУ} = 1000$  °С.

Для передачи тепла в парогенераторе от нейтрального газа к циркулируемому пароводяному потоку достаточно 200–270 °С.

Отсюда следует, что пар в ПСУ будет расширяться от  $t_1 = 730$  °С до температуры  $t_2 = 30$  °С, т. е. полезный перепад температур составляет  $\Delta t_{ПСУ} = 700$  °С.

Далее по правилу аддитивности находим термический КПД бинарного цикла

$$\eta_t = \eta'_t \frac{\Delta t_{ГТУ}}{\Delta t_{ГТУ} + \Delta t_{ПСУ}} + \eta''_t \frac{\Delta t_{ПСУ}}{\Delta t_{ГТУ} + \Delta t_{ПСУ}} \approx 0,64.$$

В то же время, КПД цикла Карно для тех же условий составляет  $\eta = 81$  % [1].

Справедливости ради следует отметить, что порядка 15 % своей мощности станция будет затрачивать на производство кислорода. Однако на стоимости электроэнергии, отпускаемой потребителям, это обстоятельство не должно сказаться, поскольку из неё исключается налог на выброс углерода в атмосферу.

### Выводы

Анализ патентных материалов показывает, что повышение КПД ГТУ идёт по пути увеличения давления рабочей среды. При этом жёсткая механическая связь между компрессором и турбиной заменяется на более гибкую электрическую связь. Привод компрессора служит электродвигатель, который потребляет часть электроэнергии, вырабатываемой турбогенератором.

В итоге компрессор развивает давление до 30 МПа. Наиболее оптимальным считают замкнутый цикл, в котором в качестве рабочего тела используют одноатомные газы: гелий, аргон или ксенон.

Экономичный процесс изотермического сжатия газов обеспечивают за счёт фазового превращения фреона, добавляемого в систему. Цикл предусматривает возможность рекуперации тепла. Перечисленные мероприятия позволяют приблизить КПД цикла ГТУ к КПД установок, работающих по циклу Карно.

Дальнейшее повышение эффективности ГТУ связывают с увеличением температуры процесса. Последнее возможно лишь при замене металла, идущего на изготовление турбин и компрессоров, на углеродный материал.

Попытка применения известных углеродных материалов для изготовления роторов центрифуг привела к заключению, что для изготовления турбин следует использовать недавно синтезированные материалы – фуллерен и графен.

Учитывая требования по сокращению выбросов углерода в атмосферу, сжигание топлива необходимо производить в кислороде, что позволит отделить диоксид углерода от продуктов сгорания, оживить его и закачать в глубины Земли.

Предварительные расчёты показывают, что КПД высокотемпературного бинарного цикла, реализуемого совместно ГТУ и ПСУ, может достигать 64 %.

### Список литературы

- 1 **Ястржембский, А. С.** Техническая термодинамика [Текст] / **А. С. Ястржембский.** – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1960. – 495 с.
- 2 **Кириллин, В. А.** Техническая термодинамика [Текст] / **В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин.** – М. : Наука, 1979. – 592 с.
- 3 US Patent No.: 7,426,832 B2. Appl. No.: 11/212,815. Int. Cl. F 01K 7/34 (2006.01). U.S. Cl. 60/653. Universal Thermodynamic Gas Turbine In A Closed Carnot Cycle [Electronic resource] / **Marius A. Paul**, 1120 E. Elm Ave., Fullerton, CA (US) 92831. Filed: Aug. 25, 2005. Date of Patent: Sep. 23, 2008. – Mode of access: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US7426832.pdf>. – Last access: 10 Jan. 2016.
- 4 US Patent No.: 6,282,897 B1. Appl. No.: 09/583,103. Int. Cl.7 F 02B 39/10. U.S. Cl. 60/598. Advanced Ther-

- mo-Electronic Systems For Hybrid Electric Vehicles [Electronic resource] / **Marius A. Paul**, 1120 E. Elm Ave., Fullerton, CA (US) 92631. Filed: May 18, 1998. Date of Patent: Sep. 4, 2001. – Mode of access: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US6282897.pdf>. – Last access: 10 Jan. 2016.
- 5 US Patent Application Pub. No.: 2010/0170245 A1. Appl. No.: 12/596,261. Int. Cl. F 02B 33/44 (2006.01). U.S. Cl. 60/607. Turbocharger Configuration And Turbochargeable Internal Combustion Engine [Electronic resource] / **Dick Amos**, Lincoln (GB); **Ulrich Bast**, Munchen (DE); **Francis Heyes**, Lincoln (GB); **Norbert Huber**, Erlangen (DE); **Andre Kaufmann**, Baienfurt (DE); **Achim Koch**, Tegernheim (DE); **Georg Mehne**, Wenzelbach (DE); **Gerhard Schopp**, Pettendorf (DE); **Udo Schwerdel**, Gerolsheim (DE); **Markus Teiner**, Regensburg (DE). PST Filed: April 8, 2008. PCT No.: PCT/EP2008/054236. Pub. Date: Jul. 8, 2010. – Mode of access: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20100170245.pdf>. – Last access: 10 Jan. 2016.
- 6 US Patent Application Pub. No.: 2010/0313558 A1. Appl. No.: 12/866,379. Int. Cl. F02G 1/04 (2006.01). U.S. Cl. 60/517. Method Of Externally Modifying A Carnot Engine Cycle [Text] / **Robert Thiessen, Calgary** (CA). PST Filed: Feb. 9, 2009. PCT No.: PCT/CA09/00167. Pub. Date: Dec. 16, 2010. – Mode of access: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20100313558.pdf>. – Last access: 10 Jan. 2016.
- 7 **Васильев, О.** Паливна комірка [Текст] / **О. Васильев** // Электропанорама. – Киев, 2000. – № 3. – С. 18–20.
- 8 **Elshof, Johan Evert ten.** Dense inorganic membranes: Studies on transport properties, defect chemistry and catalytic behavior [Text] / **ten J. E. Elshof** // Commission of the European Communities in the framework of the Joile programme. – Enchede : Print Papers Ipskamp of The Netherlands, 1997. – 152 pp. available at: <http://doc.utwente.nl/9189/> (Accessed 12 Apr. 2016).
- 9 **Stein, V. E.** Improving IGCC Economics through ITM Oxygen Integration [Text] / **V. E. Stein, E. Jumono, E. P. Demetri** // 18th Intern. Pittsburgh Coal Conf., 4–7 Dec. 2001. – Newcastle : NSW, Australia. – 15 pp.
- 10 **Barbara, McKee.** Solutions for the 21st Century [Text] / **McKee Barbara** // Zero Emissions Technologies for Fossil Fuels. – NY : International Energy Agency, 2002. – 48 pp.
- 11 **Yantovski, E.** Zeitmop Cycle [Text] / **E. Yantovski, J. Gorski, B. Smyth, ten J. Elshof** // Proceedings of ECOS 2002, July 3–5, 2002, Berlin, – P. 1153–1160. available at: <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbon-seq/PDFs/230.pdf> (Accessed 12 Apr. 2016).
- 12 **Гурин, В. А.** Газофазные методы получения углеродных и углерод-углеродных материалов [Текст] / **В. А. Гурин, В. Ф. Зеленский** // Вопр. атом. науки и техники. Физика радиац. повреждений и радиац. материаловедение. – Харьков, 1999. – Вып. 4(76). – С. 13–31.
- 13 **Трошенькин, В. Б.** Разделение сплавов в центробежном поле с получением алюминия [Текст] / **В. Б. Трошенькин** // Вестник НТУ «ХПИ». Серия:

- Новые решения в современных технологиях. – Харьков, 2006. – № 27. – С. 88–92. – p-ISSN: 2079-5459. – e-ISSN: 2413-4295.
- 14 **Schmitt, H.** Löslichkeit von Kohlenstoff in der Al-Si Legierungen [Text] / **H. Schmitt, H. Witter** // *Z. Erzbergbau*. – 1960. – Bd. XIII, N. 10. – S. 471.
  - 15 **Куликов, И. С.** Термодинамика карбидов и нитридов [Текст] : справ. / **И. С. Куликов**. – Челябинск : Metallurgija, 1980. – 320 с.
  - 16 **Чурилов, Г. Н.** Фуллерены: синтез и теория образования [Текст] / **Г. Н. Чурилов, Н. В. Булина, А. С. Федоров**. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2007. – 230 с.
  - 17 **Трошенькин, Б. А.** Совершенствование термодинамических циклов газотурбинных установок [Текст] / **Б. А. Трошенькин, В. Б. Трошенькин** // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. науч. статей. – Днепропетровск : Изд-во НППВ «Триакон». – 2014. – № 2(15). – С. 45–48. – ISSN 2076-6866.
  - 18 **Некрасов, Б. В.** Основы общей химии [Текст] / **Б. В. Некрасов**. – М. : Химия, 1973. – Т. 1. – 656 с.
  - 19 **Зыснн, В. А.** Комбинированные парогазогенераторные установки и циклы [Текст] / **В. А. Зыснн**. – М. : Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 187 с.

## Bibliography (transliterated)

- 1 **Yastrzhembsky, A. S.** (1960), *Tehnicheskaja termodinamika [Technical Thermodynamics]*, Gosjenergoizdat [Gosenergoizdat], Moscow, Russia.
- 2 **Kyrylyn, V. A., Syichev, V. V. and Sheidlyn, A. E.** (1979), *Tehnicheskaja termodinamika [Technical Thermodynamics]*, Nauka [Science], Russia.
- 3 US Patent No.: 7,426,832 B2. Appl. No.: 11/212,815. Int. Cl. F 01K 7/34 (2006.01). U.S. Cl. 60/653. Universal Thermodynamic Gas Turbine In A Closed Carnot Cycle [Text] / **Marius A. Paul**, 1120 E. Elm Ave., Fullerton, CA (US) 92831. Filed: Aug. 25, 2005. Date of Patent: Sep. 23, 2008. available at: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US7426832.pdf> (Accessed 10 Jan. 2016).
- 4 US Patent No.: 6,282,897 B1. Appl. No.: 09/583,103. Int. Cl. F 02B 39/10. U.S. Cl. 60/598. Advanced Thermo-Electronic Systems For Hybrid Electric Vehicles [Text] / **Marius A. Paul**, 1120 E. Elm Ave., Fullerton, CA (US) 92631. Filed: May 18, 1998. Date of Patent: Sep. 4, 2001. available at: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US6282897.pdf>. (Accessed 10 Jan. 2016).
- 5 US Patent Application Pub. No.: 2010/0170245 A1. Appl. No.: 12/596,261. Int. Cl. F 02B 33/44 (2006.01). U.S. Cl. 60/607. Turbocharger Configuration And Turbochargeable Internal Combustion Engine [Text] / **Dick Amos**, Lincoln (GB); **Ulrich Bast**, Munchen (DE); **Francis Heyes**, Lincoln (GB); **Norbert Huber**, Erlangen (DE); **Andre Kaufmann**, Baienfurt (DE); **Achim Koch**, Tegernheim (DE); **Georg Mehne**, Wenzelnbach (DE); **Gerhard Schopp**, Pettendorf (DE); **Udo Schwerdel**, Gerolsheim (DE); **Markus Teiner**, Regensburg (DE). PST Filed: April 8, 2008. PCT No.: PCT/EP2008/054236. Pub. Date: Jul. 8, 2010. available at: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20100170245.pdf>. (Accessed 10 Jan. 2016).
- 6 US Patent Application Pub. No.: 2010/0313558 A1. Appl. No.: 12/866,379. Int. Cl. F02G 1/04 (2006.01). U.S. Cl. 60/517. Method Of Externally Modifying A Carnot Engine Cycle [Text] / **Robert Thiessen**, Calgary (CA). PST Filed: Feb. 9, 2009. PCT No.: PCT/CA09/00167. Pub. Date: Dec. 16, 2010. available at: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20100313558.pdf>. (Accessed 10 Jan. 2016).
- 7 **Vasilev, O.** (2000), *Palyvna komirka [Fuel Cell]*, Jelektropanorama [Electroprospect], Kyiv, no. 3, pp. 18–20.
- 8 **Elshof, Johan Evert ten.** (1997), "Dense inorganic membranes: Studies on transport properties, defect chemistry and catalytic behavior", *Commission of the European Communities in the framework of the Joile programme*, Print Papers Ipskamp of The Netherlands, Enchede, **Netherlands**. available at: <http://doc.utwente.nl/9189/> (Accessed 12 Apr. 2016).
- 9 **Stein, V. E., Jumono, E. and Demetri, E. P.** (2001), "Improving IGCC Economics through ITM Oxygen Integration", *18th Intern. Pittsburgh Coal Conf., 4–7 Dec. 2001*, NSW, Newcastle, Australia.
- 10 **Barbara, McKee.** (2002), "Solutions for the 21st Century", *Zero Emissions Technologies for Fossil Fuels*, International Energy Agency, NY, USA.
- 11 **Yantovski, E., Gorski, J., Smyth, B. and Elshof J. ten** (2002), "Zeitmop Cycle", *Proceedings of ECOS 2002, July 3–5*, pp. 1153–1160, Berlin, **Germany**. available at: <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbon-seq/PDFs/230.pdf> (Accessed 12 Apr. 2016).
- 12 **Gyrin, V. A. and Zelensky, V. F.** (1999), "Gazofaznye metody poluchenija uglerodnyh i uglerod-uglerodnyh materialov [The Gas-Phase Methods For Producing The Carbon And Carbon-Carbon Materials]", *Vopr. atom. nauki i tehniki. Fizika radiac. povrezhdenij i radiac. materialovedenie [The Problems Of Nuclear Science And Technology. The Physics Of Radiation Damage And Radiation Materials]*, no. 4(76), pp. 13–31.
- 13 **Troshenkin, V. B.** (2006), "Razdelenie splavov v centrobezhnom pole s polucheniem aljuminija [Separation Of The Alloys In The Centrifugal Field For Producing Of Aluminum]", *Bulletin of NTU "KhPI", Series: New solutions in modern technologies*, no. 27, pp. 88–92, p-ISSN: 2079-5459, e-ISSN: 2413-4295.
- 14 **Schmitt, H. and Witter, H.** (1960), "Löslichkeit von Kohlenstoff in der Al-Si Legierungen", *Z. Erzbergbau*, Bd XIII, N. 10, pp. 471.
- 15 **Kylykov, I. S.** (1980), *Termodinamika karbidov i nitridov [Thermodynamics Of Carbides And Nitrides]*, Metallurgija [Metallurgy], Chelyabinsk, Russia.
- 16 **Chyrylov, G. N., Bylyna, N. V. and Fedorov, A. S.** (2007), *Fullereny: sintez i teorija obrazovanija [Fullerenes: Synthesis And Theory Of Forming]*, Publishing house of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.
- 17 **Troshenkin, B. A. and Troshenkin, V. B.** (2014), "Sovershenstvovanie termodinamicheskikh ciklov gazoturbinnyh ustanovok [Improving The Thermodynamic Cycles Of Gas Turbines]", *Sovremennaja nauka: issledovanija, idei, rezul'taty, tehnologii [Modern sci-*



- ence: researches, ideas, results, technologies], no. 2(15), pp. 45–48, Publishing house of Scientific Production And Innovation Company "Triacon", Dnepropetrovsk, Ukraine, ISSN 2076-6866.
- 18 **Nekrasov, B. V.** (1973), *Osnovy obshhej himii [The Basics Of General Chemistry]*, Himija [Chemistry], Moscow, Russia.
- 19 **Zysin, V. A.** (1962), *Kombinirovannye parogazogeneratorsnye ustanovki i cikly [Combined steam and gas generator sets and cycles]*, Gosenergoizdat [Gosenergoizdat], Moscow, Russia.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Трошенькин Борис Александрович** – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Отдел оптимизации процессов и конструкций, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины; г. Харьков, Украина; e-mail: troshenkin@ipmach.kharkov.ua, troshenkinv@gmail.com, ORCID 0000-0001-9661-9489.

**Troshenkin Boris** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Position, Affiliation, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Dm. Pozharsky st. 2/10, Kharkov, Ukraine.

**Трошенькин Владислав Борисович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Отдел оптимизации процессов и конструкций, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, ул. Дм. Пожарского, 2/10, Украина, e-mail: troshenkin@ipmach.kharkov.ua, ORCID 0000-0001-9661-9489.

**Troshenkin Vladislav** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Dm. Pozharsky st. 2/10, Kharkov, Ukraine.

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Трошенькин, Б. А.** Повышение эффективности газотурбинных установок, работающих по замкнутому циклу [Текст] / **Б. А. Трошенькин, В. Б. Трошенькин** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 76–84. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.11.

*Please cite this article as:*

**Troshenkin, B. and Troshenkin, V.** (2016), "Increasing the Efficiency of Closed-Cycle Gas Turbine Power Plants", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 9(1181), pp. 76–84, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.11.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Трошенькін, Б. О.** Підвищення ефективності газотурбінних установок, що працюють по замкнутому циклу [Текст] / **Б. О. Трошенькін, В. Б. Трошенькін** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 76–84. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.11.

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто основні етапи «дизелізації» газотурбінних установок (ГТУ), зафіксовані в патентній літературі. «Дизелізація» заснована на принципі незалежності тиску, що розвивається компресором, від витрат газу. Виконання ряду технологічних і конструктивних удосконалень в ГТУ, дає можливість збільшити тиск газу, що подається до джерела тепла, до 30 МПа. Остання обставина дозволяє підвищити ККД ГТУ до 70 %. Проте, обмеження з боку міцних властивостей матеріалів не дозволяють використовувати частину наявного температурного напору для вироблення електроенергії. Дане положення можна виправити, застосувавши для виготовлення турбін і компресорів вуглецеві матеріали і, зокрема, фулерени. Дослідним шляхом встановлено, що мікротрос з нанотрубок фулерену товщиною в людський волос здатний витримувати вантажі в десятки тон. При високих температурах властивості міцності вуглецевих матеріалів змінюються незначно. У доповіді дано аналіз замкнутого циклу, робочим тілом в якому прийняті гелій і аргон. Ефективність розробленого високотемпературного циклу дозволяє наблизитися до ефективності циклу Карно.

**Ключові слова:** газотурбінна установка, дизелізація, ККД, фулерени, замкнутий цикл, цикл Карно.

Поступила (received) 03.01.2016