

УДК 620.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЬНОЙ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Жаров А.В., Павлов А.А., Фавстов В.С., Горшков Р.В.

*ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный технический университет»,
Ярославль, e-mail: pavlova@list.ru*

Когенерационные установки компактной конструкции с дизелями могут быть использованы для установки на наземный транспорт с целью снабжения их тепловой и электрической энергией во время длительных стоянок. Однако в практике создания когенерационных установок транспортных средств существует определенный информационный пробел, связанный с вопросами эффективности их применения. В связи с этим целью настоящей работы является экспериментальное изучение особенностей работы когенерационной установки транспортного средства для определения эффективности её применения. При помощи испытательного стенда когенерационной установки транспортного средства определены параметры её тепловой и электрической мощности, коэффициенты использования теплоты сгорания топлива. В итоге выполнения работы были установлены параметры эффективности когенерационной установки транспортного средства. Коэффициент использования теплоты сгорания топлива когенерационной установки транспортного средства на максимальном мощностном режиме составляет 0,72, а на 1 кВт электрической энергии приходится 2,86 кВт тепловой.

Ключевые слова: когенерационная установка, транспортное средство, испытательный стенд, электронагреватели, утилизация энергии, эффективность

EXPERIMENTAL STUDYING OF CHARACTERISTICS OF DIESEL COGENERATION INSTALLATION OF THE VEHICLE

Zharov A.V., Pavlov A.A., Favstov V.S., Gorshkov R.V.

FGBOU VPO «The Yaroslavl state technical university», Yaroslavl, e-mail: pavlova@list.ru

Cogeneration unit compact design with diesel engines are used for installation on ground transport with the purpose of supply of thermal and electric energy during long-term Parking. When creating cogeneration unit there is a certain lack of information associated with the effectiveness of their application. The aim of this work is experimental study of features of work of a cogeneration unit to determine the effectiveness of its application. When tested cogeneration units defined the parameters of its heat and electric power. The calculated coefficients of using the heat of combustion of fuel. Installed the parameters of efficiency of cogeneration unit. Utilization of heat of combustion of fuel cogeneration units on the maximum power mode, is 0,72. On 1 kW of electrical energy will have 2,86 kW of heat

Keywords: cogeneration installation, vehicle, test bench, electric heaters, energy utilization, efficiency

На водном транспорте технологии комбинированной выработки тепловой и электрической энергии (технологии когенерации) используются уже значительное время. Известно [6], что на судах различного назначения имеются в составе энергетической установки блоки утилизации тепловой энергии (БУТ). БУТ энергетических установок судов позволяют утилизировать тепловую энергию охлаждающей жидкости и отработанных газов их двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Для автомобильного и железнодорожного транспорта подобные технологии снабжения их тепловой и электрической энергией только начинают развиваться. В работах [2, 5] была предложена теплоэнергетическая установка позволяющая одновременно вырабатывать на борту транспортного средства (крупнотоннажный автомобиль, тепловоз) тепловую и электрическую энергию. Теплоэнергетические установки для автомобильного и железнодорожного транспорта представляют собой когенерационные установки (КГУ)

компактной конструкции соответствующих тепловой и электрической мощностей. Вместе с тем отметим, что в практике создания КГУ транспортных средств существует определенный информационный пробел, связанный с вопросами эффективности их применения. В связи с этим целью настоящей работы является экспериментальное изучение особенностей работы КГУ транспортного средства для определения параметров эффективности её применения.

Вопросы проектирования и выбора параметров агрегатов КГУ транспортного средства приводятся в работе [5]. На основании данных, указанных в работе [5], для проведения исследований была разработана и создана КГУ транспортного средства, содержащая одноцилиндровый вихрекамерный дизель жидкостного охлаждения с диаметром цилиндра 100 мм и ходом поршня 107 мм, соединенный с синхронным трехфазным электрогенератором переменного тока. Номинальная мощность дизеля КГУ составляет 10 кВт при 2300 мин⁻¹.

Синхронный электрогенератор КГУ имеет номинальную мощность 4 кВт, снабжен регулятором напряжения, поддерживающим его напряжение 28 В, и выпрямителем. Все указанные технические устройства позволяют применять электрогенератор для питания электроэнергией электрооборудования бортовых сетей большинства транспортных средств с номинальным напряжением 24 В. Коэффициент полезного действия (КПД) применяемого на КГУ транспортного средства синхронного электрогенератора при частоте вращения его ротора 2300 мин^{-1} , составляет 43 %. Низкий КПД синхронного электрогенератора КГУ обусловлен его удельной массовой характеристикой, которая составляет 5 кг/кВт , и вентиляционными потерями, возникающими при продувке его воздухом с целью охлаждения. Указанная удельная масса синхронного генератора характерна для компактных конструкций, предназначенных для установки на автотракторные ДВС. В нашем случае, руководствуясь стремлением уменьшить

массо-габаритные характеристики КГУ транспортного средства был выбран именно такой синхронный генератор с достаточно низким КПД. Масса выбранного синхронного генератора составляет 20,8 кг. Здесь также необходимо отметить, что синхронные электрогенераторы переменного тока с КПД 80 % и выше в диапазоне электрических мощностей 4...10 кВт имеют удельную массовую характеристику, составляющую 11...18 кг/кВт.

В систему охлаждения дизеля КГУ встроен специальный бак, в котором установлены 5 электронагревателей мощностью 500 Вт каждый. Электронагреватели, установленные в баке, подключаются поочередно до суммарной мощности 2,5 кВт и предназначены для выработки дополнительной тепловой энергии. Отметим, что в работе [1] обосновывается рациональность применения на дизельных КГУ подобных электронагревателей. Гидравлическая схема исследуемой КГУ транспортного средства приведена на рис. 1.

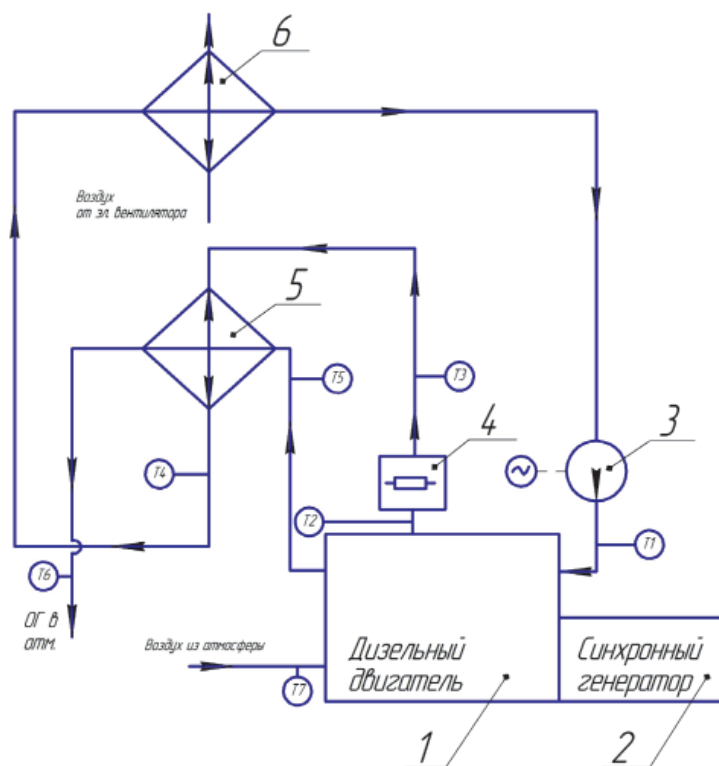


Рис. 1. Гидравлическая схема КГУ транспортного средства:

1 – дизельный двигатель, 2 – синхронный генератор, 3 – центробежный насос с электроприводом, 4 – бак с электронагревателями, 5 – теплообменник – утилизатор теплоты отработанных газов дизельного ДВС, 6 – радиатор

Для утилизации тепловой энергии отработанных газов дизеля КГУ использован пластинчато-трубчатый теплообменник, созданный по патенту [4].

Стенд для испытания КГУ транспортного средства оборудован следующими контрольно-измерительными приборами: расходомер теплоносителя турбинного типа;

платиновые термометры сопротивления; термопары, типа ТХА; расходомер часового расхода топлива; манометр; вольтметр; амперметр. Датчики температуры испытательного стенда КГУ транспортного средства (в соответствии с рис. 1): T_1 – температура теплоносителя на входе в систему охлаждения дизеля КГУ транспортного средства; T_2 – температура на выходе из системы охлаждения дизеля КГУ; T_3 – температура теплоносителя на входе в теплообменник, утилизатор теплоты отработанных газов; T_4 – температура теплоносителя на выходе из теплообменника, утилизатора теплоты отработанных газов; T_5 – температура отработанных газов на входе в теплообменник, утилизатор их теплоты; T_6 – температура

отработанных газов на выходе из теплообменника, утилизатора их теплоты; T_7 – температура окружающего воздуха на входе в дизель КГУ.

Центробежный насос с электроприводом, два электроventильатора радиатора, аккумуляторные батареи и бак с электронагревателями образуют единую бортовую сеть стенда для испытания КГУ транспортного средства. Суммарный ток потребления всего электрооборудования испытательного стенда КГУ составляет 120 А. Общая электрическая мощность при этом составляет 3,36 кВт (при номинальной мощности электрогенератора 4 кВт). Вид стенда для испытания КГУ транспортного средства представлен на рис. 2.

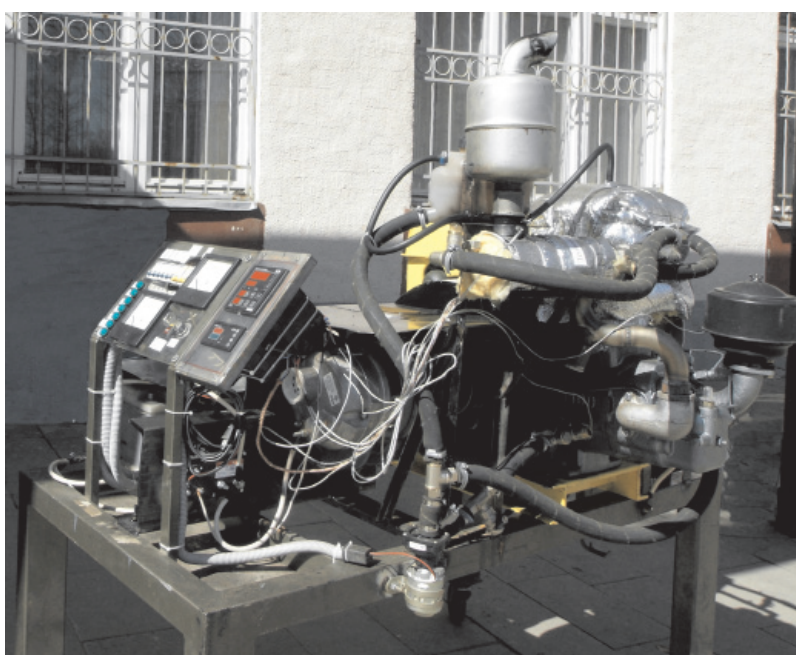


Рис. 2. Стенд для испытания когенерационной установки транспортного средства

Испытания КГУ транспортного средства выполнялись в следующей последовательности: предварительный прогрев дизеля КГУ транспортного средства; установка мощностного режима КГУ (обеспечивается включением центробежного насоса с электроприводом, электроventильаторов радиатора и необходимого количества электрических нагревателей в баке); осуществление выхода КГУ на стационарный тепловой режим при установленной электрической мощности; запись контролируемых параметров КГУ транспортного средства. Комбинацией включения электрооборудования КГУ транспортного средства обеспечиваются пять её нагрузочных режимов, кВт: 0,65; 2,44;

2,84; 3,01; 3,36. После выхода КГУ на стационарный тепловой режим измеряются все температуры (в соответствии с рис. 1), расход теплоносителя, часовой расход топлива, ток и напряжение электрогенератора. При обработке результатов испытания КГУ транспортного средства определялись нижеприведенные параметры.

Потенциальная мощность (кВт), эквивалентная количеству теплоты, введенной с топливом в единицу времени:

$$P = \frac{H_u \cdot G_t}{3600}, \quad (1)$$

где H_u – теплотворная способность топлива, кДж/кг; G_t – часовой расход топлива, кг/ч.

Мощность дизеля КГУ в кВт:

$$Ne = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot \eta_{\text{ген}}}, \quad (2)$$

где U – напряжение электрогенератора, В;
 I – ток электрогенератора, А; $\eta_{\text{ген}}$ – КПД электрогенератора.

Электрическая мощность КГУ транспортного средства, кВт:

$$P_{\text{эл}} = \frac{U \cdot I}{1000}. \quad (3)$$

Тепловая мощность КГУ транспортного средства, кВт:

$$P_{\text{тепл}} = C_{\text{тепл}} \cdot G_{\text{тепл}} \cdot (T_4 - T_1), \quad (4)$$

где $C_{\text{тепл}}$ – теплоемкость теплоносителя (воды), кДж/(кг К); $G_{\text{тепл}}$ – расход теплоносителя, кг/с.

Тепловая мощность теплообменника, утилизатора теплоты отработанных газов дизеля КГУ транспортного средства, кВт:

$$P_{\text{ог}} = C_{\text{тепл}} \cdot G_{\text{тепл}} \cdot (T_4 - T_3). \quad (5)$$

Тепловая мощность системы охлаждения дизеля КГУ, кВт:

$$P_{\text{со}} = C_{\text{тепл}} \cdot G_{\text{тепл}} \cdot (T_2 - T_1). \quad (6)$$

Полная мощность КГУ транспортного средства, кВт:

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{тепл}} + P_{\text{эл}}. \quad (7)$$

Коэффициент использования теплоты сгорания топлива, представляющий собой долю теплоты, подведенную с топливом, превращенную в электрическую и тепловую энергии:

$$\eta_{\text{топл}} = \frac{P_{\text{полн}}}{P}. \quad (8)$$

Эффективный КПД дизеля КГУ транспортного средства:

$$\eta_e = \frac{3600}{Hu \cdot \frac{G_t}{Ne}}. \quad (9)$$

Тепловой и электрический КПД КГУ транспортного средства:

$$\eta_{\text{тепл}} = \frac{P_{\text{тепл}}}{P}; \quad \eta_{\text{эл}} = \frac{P_{\text{эл}}}{P}. \quad (10)$$

Мощностные характеристики КГУ транспортного средства представлены следующими параметрами: (1) (5), (6), (7) – на рис. 3. К показателям, характеризующим эффективность КГУ следует относить (8), (9), (10) – представлены на рис. 4. Коэффициент использования теплоты сгорания топлива КГУ (рис. 4) приведен как для случая применения электронагревателей, встроенных в её гидравлическую цепь, так и без них.

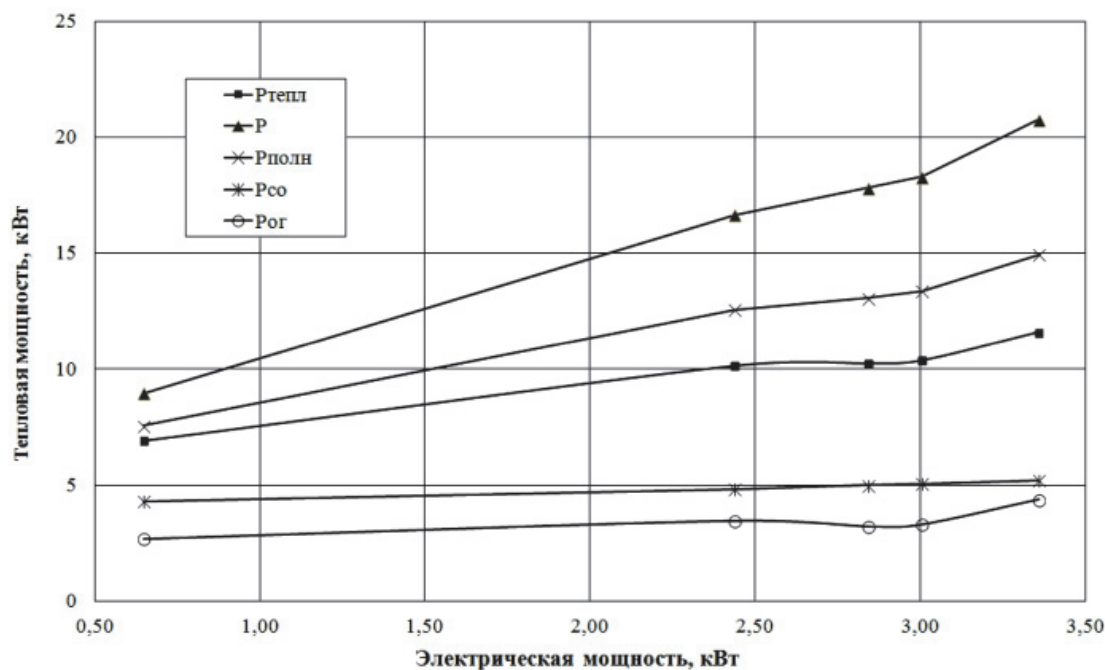


Рис. 3. Зависимость тепловых мощностей от электрической когенерационной установки транспортного средства

Для определения коэффициента использования теплоты сгорания топлива КГУ без

применения электронагревателей применяли следующую формулу:

$$P_{\text{тепл}} = P_{\text{CO}} + \left[\left(1 - \eta_e - \frac{P_{\text{CO}}}{P} - q_{\text{пот}} \right) \cdot P \right] \cdot \eta_{\text{ут}}, \quad (11)$$

где $q_{\text{пот}}$ – относительное количество теплоты, теряемой дизелем КГУ транспортного средства со своих наружных поверхностей в окружающую среду конвекцией

и излучением; $\eta_{\text{ут}}$ – глубина утилизации тепловой энергии, уносимой с отработанными газами дизеля КГУ транспортного средства.

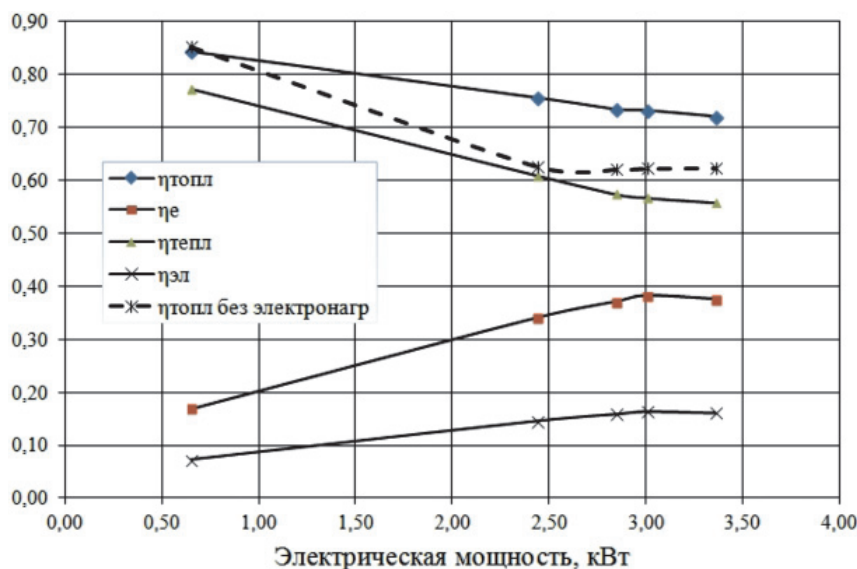


Рис. 4. КПД когенерационной установки транспортного средства

Согласно работе [3] относительное количество теплоты, теряемой дизелем КГУ транспортного средства со своих наружных поверхностей в окружающую среду конвекцией и излучением, составляет 1,5%, следовательно, можно принять $q_{\text{пот}} = 0,015$.

$\eta_{\text{ут}}$ представляет собой следующее выражение:

$$\eta_{\text{ут}} = \frac{P_{\text{ог}}}{\left(1 - \eta_e - \frac{P_{\text{CO}}}{P} - q_{\text{пот}} \right) \cdot P}. \quad (12)$$

Исследованиями КГУ транспортного средства установлены значения $\eta_{\text{ут}}$, которые приведены в таблице.

Глубина утилизации тепловой энергии отработанных газов дизеля КГУ

$P_{\text{эл}}, \text{ кВт}$	0,65	2,44	2,84	3,01	3,36
$\eta_{\text{ут}}$	0,89	0,68	0,64	0,66	0,69

Анализ характеристик, приведенных на рис. 3, показывает в общем случае их линейный характер изменения. С увеличением электрической мощности КГУ транспортного средства увеличиваются практически линейно её полная мощность, тепловая и потенциальная. Но здесь следует отметить, что в диапазоне электрической

мощности, равной 3 кВт, происходит некоторое изменение (в сторону уменьшения) характеристик потенциальной, полной и тепловой мощности КГУ транспортного средства. Объяснить выявленный характер изменения вышеуказанных мощностей можно с точки зрения изменения величины эффективного КПД дизеля КГУ

транспортного средства (9), характеристика которого приведена на рис. 4. Эффективный КПД дизеля КГУ транспортного средства имеет максимальное значение при её электрической мощности 3 кВт (эффективной мощности дизельного ДВС 7 кВт) и составляет 0,38. На этом режиме как раз происходит некоторое изменение характеристик мощностных параметров КГУ транспортного средства.

Интересно отметить характер изменения величины тепловой мощности системы охлаждения дизеля КГУ. Величина указанной тепловой мощности практически остается постоянной на всех нагрузочных режимах КГУ транспортного средства. Так, на нагрузочном режиме КГУ транспортного средства соответствующего электрической мощности 0,65 кВт, $P_{\text{co}} = 4,31$ кВт, а при электрической мощности 3,36 кВт $P_{\text{co}} = 5,21$ кВт.

Тепловая мощность теплообменника, утилизатора теплоты отработанных газов дизеля КГУ транспортного средства изменяется практически линейно от 2,68 кВт при электрической мощности, соответствующей 0,65, до 4,39 кВт при максимальной электрической мощности.

Анализ данных, представленных на рис. 4, показывает, что коэффициент использования теплоты сгорания топлива при максимальной электрической мощности (равной 3,36 кВт) составляет 0,72. То есть 72% энергии от введенной в результате сгорания топлива в камеру сгорания дизеля КГУ транспортного средства используется ей. Тепловой КПД на режиме максимальной электрической мощности составляет 0,56, а электрический – 0,16. Рост эффективного КПД дизеля КГУ в зависимости от электрической нагрузки сопровождается уменьшением ее теплового КПД и коэффициента использования теплоты сгорания топлива. Максимальное значение коэффициента использования теплоты сгорания топлива у КГУ, составляющее 0,84, наблюдается на её минимальном нагрузочном режиме (при электрической мощности 0,65 кВт). На минимальном нагрузочном режиме работы КГУ транспортного средства эффективный КПД её дизеля составляет 0,17, при этом теплота, которая в обычном ДВС передается теплоносителем в его системе охлаждения, а также выбрасывается в окружающую среду с его отработанными газами, в нашем случае практически полностью утилизируется. Анализ данных, представленных на рис. 4, также выявил, что величина коэффициента использования теплоты сгорания топлива КГУ транспортного средства будет выше на всех режимах её работы, когда приме-

няются электронагреватели. Увеличение величины коэффициента использования теплоты сгорания топлива при использовании электронагревателей составляет в среднем 13%.

Используя полученные данные в плане эффективности когенерационной установки транспортного средства, можно заключить, что любая проектируемая КГУ должна создаваться для конкретной цели, а именно генерации требуемого вида энергии (тепловой, электрической, тепловой и электрической). Для генерации преимущественно тепловой энергии когенерационной установкой целесообразно использовать на ней электрогенераторы с низким КПД и электрические устройства, преобразующие электрическую энергию в тепловую. В этом рассматриваемом случае побочным видом энергии будет электрическая. Если КГУ предназначается в первую очередь для генерации электрической энергии, то здесь целесообразно применить как ДВС, так и электрогенератор с максимально возможными значениями их КПД. В этом случае тепловая энергия станет побочным продуктом. Например, в нашем случае, соотнеся тепловую и электрическую мощность КГУ транспортного средства, можно сделать вывод о том, что на её номинальном режиме работы на 1 кВт электрической энергии будет приходиться 2,86 кВт тепловой энергии. Притом, например, в условиях низких отрицательных температур главным видом энергии будет являться именно тепловая. И здесь налицо выявляются основные преимущества созданной КГУ транспортного средства.

В итоге выполнения работы были установлены параметры эффективности КГУ транспортного средства. Коэффициент использования теплоты сгорания топлива КГУ транспортного средства на максимальном мощностном режиме составляет 0,72, а на 1 кВт электрической энергии будет приходиться 2,86 кВт тепловой энергии. Отметим, что КГУ транспортного средства призвана заменить широко применяемые в настоящее время автономные жидкостные подогреватели, которые имеют коэффициент использования теплоты сгорания топлива 0,70. Но при этом создаваемая КГУ транспортного средства является полностью энергонезависимой, а для осуществления работы автономного жидкостного подогревателя требуется электроэнергия. Как правило, электроэнергией автономные жидкостные подогреватели снабжают аккумуляторные батареи, которые постоянно разряжаются при его работе.

Список литературы

1. Валиулин С.Н., Фролов М.В. Эффективность применения электрического котла в составе когенерационной дизель-электрической установки // мВестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2010. – № 1. – С. 82–88.
2. Жаров А.В., Павлов А.А., Лебедев А.Е. Теплоэнергетическая установка // Патент России № 2421626, 20.06.2011. Бюл. № 17.
3. Жидкостное охлаждение автомобильных двигателей / под. ред. А.Л. Новенникова. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
4. Мухачев В.А., Петровичев В.Ю., Хапов В.С., Киров С.А. Теплообменная труба некруглого сечения // Патент России № 1210050, 07.02.1986. Бюл. 11-1994.
5. Павлов А.А., Жаров А.В., Лебедев А.Е. Установка для выработки тепловой и электрической энергии на борту АТС // Автомобильная промышленность. – М.: Машиностроение, 2012, октябрь. – С. 13–14.
6. Селиверстов В.И. Утилизация тепла в судовых дизельных установках. – Л.: Судостроение, 1973. – 218 с.

References

1. Valiulin S.N., Frolov M.V. *Effektivnost primeneniya elektricheskogo kotla v sostave kogeneracionnoy dizel-elektricheskoy ustanovki* (Efficiency of application of an electric copper as a part of the cogeneration diesel electric installation). Messenger of the Astrakhan state technical university. Series: Sea equipment and technology, 2010, no. 1, pp. 82–88.

2. Zharov A.V., Pavlov A.A., Lebedev A.E. *Teploenergeticheskaya ustanovka* (Heat power installation). The patent of Russia, no. 2421626, 20.06.2011. The bulletin no. 17.

3. A.L. Novennikov. *Zhidkostnoe ohlazhdenie avtomobil'nyh dvigatelei* (Liquid cooling of automobile engines). Moscow: Mechanical Engineering, 1985. 176 p.

4. Muhachev V.A., Petrovichev V.U., Napov V.S., Kirov S.A. *Teploobmennaya truba nekruglogo secheniya* (Heat-exchange pipe of not round section). The patent of Russia, no. 1210050, 07.02.1986. The bulletin 11–1994.

5. Pavlov A.A., Zharov A.V., Lebedev A.E. *Ustanovka dlya vyrabotki teplovoy i elektricheskoy energii na bortu ATS* (Installation for development of thermal and electric energy onboard the automobile vehicle). Automotive industry, Moscow: Machine industry, 2012, october, pp. 13–14.

6. Seliverstov V.I. *Utilizatsiya tepla v sudovyh dizelnyh ustanovkakh* (Utilization is warm in ship diesel installations). Leningrad: Machine industry, 1973. Print.

Рецензенты:

Епархин О.М., д.т.н., профессор, директор Ярославского филиала, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения», г. Ярославль;

Рудаков В.И., д.ф.-м.н., заведующий лабораторией Ярославского филиала, ФГБН «Физико-технологический институт» Российской академии наук, г. Ярославль.

Работа поступила в редакцию 15.07.2014.