

## МЕТОД РАСЧЕТА СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ СТАЦИОНАРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В.М. Гребнев, технический директор ОАО «Волжский дизель им Маминых»

А.В. Разуваев, д.т.н., проф,

Балаковский институт техники, технологии и управления (филиал)

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина»

Д.А. Костин, аспирант,

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина»

Разработан метод расчета системы утилизации вторичных энергоресурсов ДВС на основе теплотехнических параметров теплового баланса стационарного двигателя. Приводятся регрессионные зависимости составляющих теплового баланса для стационарных дизель-генераторов, работающих на различных видах топлива.

При эксплуатации энергетических установок с поршневыми ДВС для улучшения их характеристик возможно применение систем утилизации теплоты.

Все системы утилизации теплоты ДВС принято подразделять:

- на системы внутренней утилизации теплоты;
- системы внешней утилизации теплоты.

Под внутренней утилизацией теплоты понимают ее использование для улучшения технических, экономических и экологических показателей двигателя в условиях эксплуатации.

Внешняя утилизация теплоты используется для нужд различных внешних потребителей, непосредственно не связанных с энергетическими установками (ЭУ) с ДВС.

В ситуациях, когда имеется сдвиг по времени между выработкой и потреблением тепловой энергии, в системах утилизации целесообразно применять аккумуляцию тепловой энергии. Для этих целей предпочтительно применять накопители тепловой энергии на основе веществ, претерпевающих фазовый переход плавление—кристаллизация.

На рис.1 представлена структурная схема вариантов утилизации теплоты ЭУ с ДВС.

Однако следует понимать, что окончательное решение о целесообразности утилизации того или иного вида теплоты необходимо принимать только после всестороннего анализа капитальных и эксплуатационных затрат ЭУ в целом, а также для решения некоторых специальных задач.

В настоящее время децентрализованное энергоснабжение практически всех автономных объ-

ектов осуществляется отдельно: электроснабжение — от дизельных электростанций; теплоснабжение — от котельных установок.

Как уже отмечалось, коэффициент использования теплоты (КИТ) сжигаемого топлива при раздельном энергоснабжении не превышает для дизельных электростанций (ДЭС) 32–38 % и котельных установок 70–80 %, и существенно повысить его в настоящее время за счет совершенствования каждого из энергоисточников не представляется возможным. Увеличить КИТ для ДЭС до 85 % и более можно только путем комбинированной выработки тепловой и электрической энергии за счет комплексной утилизации теплоты ДВС.

Но стоит оговориться, что идея повышения КИТ для ДЭС практически в два раза путем утилизации теплоты ДЭС не является принципиально новой.

В настоящее время большинство судовых силовых установок с ДВС оборудованы системами утилизации теплоты, как для теплофикационных целей, так и для повышения КПД собственно двигателя (с помощью паротурбоагрегатов).

В некоторых случаях, когда это позволяют массогабаритные показатели, системы утилизации

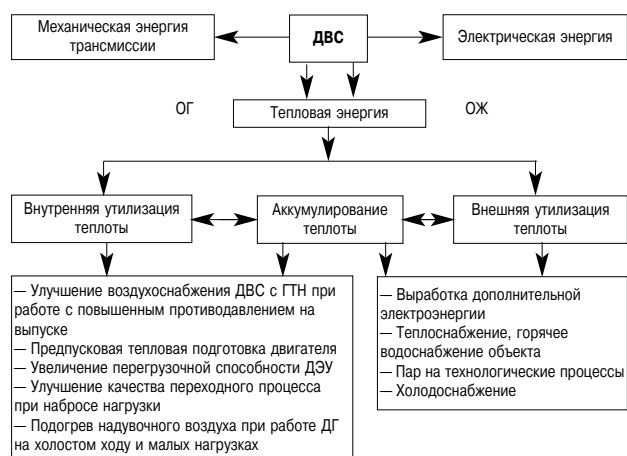


Рис. 1. Структурная схема вариантов утилизации теплоты ЭУ с ДВС

теплоты применяются в автотракторных ДВС в основном для обогрева пассажирских салонов и кабин транспортных средств.

Условия эксплуатации источников энергии стационарных автономных объектов с учетом их различного назначения существенно отличаются от соответствующих условий транспортных установок, в том числе морских и речных судов и автотракторной техники.

Во-первых, электрические и тепловые нагрузки стационарных потребителей изменяются значительно чаще и в более широком диапазоне, причем максимумы годовых и суточных графиков электро- и теплоснабжения на автономных объектах, как правило, не совпадают.

Во-вторых, существенное преобладание тепловой нагрузки над электрической (соотношение между максимальными величинами находится в пределах от 1,4 до 4) не позволяет обеспечить потребителей тепловой энергией только за счет утилизации тепла от ДЭС. Восполнить недостающее количество теплоты можно за счет усложнения теплоутилизационных схем путем включения в их состав пиковых котлов, аккумуляторов теплоты и т. п.

В-третьих, в соответствии с нормами проектирования расчетная температура воды в обратном трубопроводе системы отопления автономных объектов принимается обычно 343 К. В то же время температурный уровень потерь теплоты с охлаждающей водой в малооборотных дизелях существенно ниже. Следовательно, утилизация теплоты охлаждающей ДЭС воды для целей отопления без повышения ее температурного уровня в ряде случаев невозможна. В отношении ДВС типа ЧН21/21 это касается температурного уровня контура охлаждения наддувочного воздуха и моторного масла.

Проведенный анализ и обзор систем утилизации ведущих зарубежных производителей ДВС показал, что зарубежные фирмы идут по пути создания мини-ТЭЦ на базе ДВС с внешней утилизацией теплоты.

Необходимо отметить следующие их особенности.

1. В качестве ДВС используются, как правило, газовые двигатели. Преимущества газового топлива хорошо известны. Наряду со значительным уменьшением выбросов вредных веществ с отработавшими газами, в газовых двигателях имеет место минимальное загрязнение поверхностей деталей цилиндропоршневой группы и газопускного тракта, а также теплоутилизационных поверхностей теплообменных аппаратов даже при работе на малых нагрузках.

2. Большинство двигателей зарубежного производства имеют, как правило, высокотемпе-

ратурные системы охлаждения, что несомненно расширяет возможности утилизации теплоты охлаждающей жидкости ДВС.

3. Эффективность работы мини-ТЭЦ существенно зависит от рационального согласования режимов генерирования и потребления производимых видов энергии, поэтому зарубежные фирмы, имеющие достаточный опыт производства и эксплуатации таких установок, обычно требуют от заказчиков предоставления достоверных графиков тепловых и электрических нагрузок. Под известные графики подбирается теплоутилизационное оборудование и режимы работы энергоустановок. Установки, разработанные по такому принципу, получили название когенерационных установок.

Система утилизации теплоты отработавших газов, охлаждающей жидкости, моторного масла и наддувочного воздуха ДВС для нужд теплоснабжения получила название «система комплексной утилизации теплоты» (СКУТ).

Так как в течение года на территории России расход теплоты на отопление объекта изменяется от минимального в летний период (возможно его отсутствие) до максимального в зимний период, СКУТ может работать в различных эксплуатационных режимах и вариантах. Рассмотрим эти варианты подробнее.

*Первый вариант.* Количество теплоты, полученной от СКУТ, достаточно для обеспечения потребителя тепловой энергией на отопление, горячее водоснабжение или технологические нужды. Например, при расходе тепловой энергии на отопление весной или ранней осенью, когда отопительный сезон только начинается либо заканчивается.

Необходимое количество тепловой энергии нужно рассчитывать в зависимости от конкретных условий потребителя, а именно наружной температуры окружающего воздуха, вида и назначения зданий (жилые, производственные помещения и т. д.) либо технологические нужды производства.

В данном случае количество теплоты, вырабатываемое СКУТ, будет поддерживаться системой автоматики, обеспечивая необходимый расход газов через котел-утилизатор. Данный случай можно отнести к самому простому и оптимальному варианту применения СКУТ от стационарного ДВС.

*Второй вариант.* При работе ДВС на среднеэксплуатационных режимах, когда количество тепловой энергии, вырабатываемой СКУТ, в целом достаточно для потребителя (теплоснабжение, горячее теплоснабжение и т. д.), однако наблюдается дефицит теплоты при пике тепловых нагрузок. В этом случае недостаток в тепловой

энергии, получаемой от системы утилизации, может компенсировать тепловой аккумулятор, который рассчитывается из условия, что его энергоемкость будет достаточной для «сглаживания» недостатка теплоты.

*Третий вариант.* Величина тепловой мощности, необходимая потребителю, превосходит возможности выработки теплоты СКУТ. В данном случае необходимо знать графики тепловой и электрической нагрузки на ДВС (реальный, статистический или оценочный) для расчета количества теплоты, которое можно получить от СКУТ. Далее график электрической нагрузки пересчитывается в график тепловой мощности, получаемой от системы утилизации. Наличие графика тепловой нагрузки потребителя позволяет рассчитать количество теплоты, необходимое для «добавки» к полученной тепловой энергии.

Разность тепловых мощностей, производимой СКУТ и необходимой потребителю, компенсируется установкой дополнительного источника теплоты, например водогрейного котла, работающего на том же топливе, что и ДВС. При наличии двухтопливных двигателей (например, газодизель) водогрейный котел выбирают по результатам расчета экономической целесообразности применения того или иного вида топлива, а также возможности его транспортировки к месту назначения.

При работе двигателя на генератор коэффициент полезно используемой теплоты сгорания топлива составляет 35–38 %, а с применением СКУТ он может быть равен 80–90 %.

Уравнение теплового баланса двигателя ЭУ имеет вид:

$$Q_o = Q_e + Q_{охл} + Q_{онв} + Q_r + Q_m + Q_{ост}, \quad (1)$$

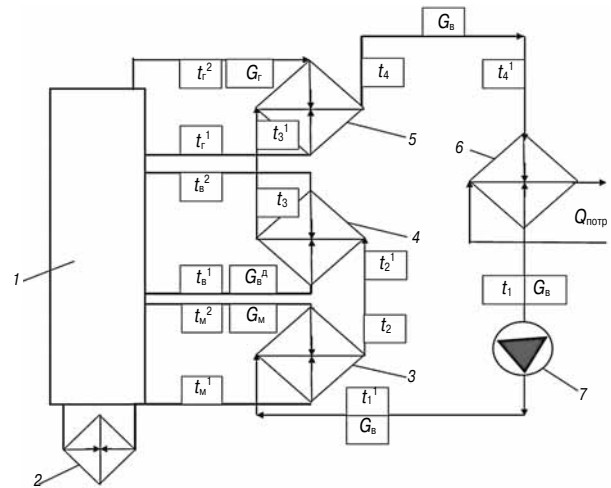
где  $Q_o$  — общее количество теплоты введенной в двигатель с топливом на определенном режиме;  $Q_e$  — теплота, эквивалентная эффективной работе двигателя;  $Q_{охл}$  — теплота, отданная охлаждающей жидкости двигателя;  $Q_{онв}$  — теплота, отданная охлаждающей жидкости в охладителе надвучного воздуха;  $Q_r$  — теплота, уносимая с отработавшими газами;  $Q_m$  — теплота, отданная маслу;  $Q_{ост}$  — остаточный член теплового баланса (не учтенные составляющими теплового баланса).

Схема системы утилизации теплоты ДВС для расчета ее параметров представлена на рис. 2.

В общем виде количество теплоты, необходимое для объекта (потребителя)  $Q_{потр}$ , будет равно количеству теплоты, вырабатываемой системой комплексной утилизации  $Q_{СКУТ}$ , и при ее нехватке — в дополнительном источнике теплоты  $Q_{диг}$  (пиковом котле):

$$\Sigma Q_{потр} = \Sigma Q_{СКУТ} + Q_{диг}. \quad (2)$$

При этом следует отметить, что данное количество теплоты в течение относительно длитель-



**Рис. 2. Схема системы утилизации теплоты ДВС для расчета ее параметров:**

1 — дизель-генератор; 2 — водо-водяной теплообменник (охлаждение надвучного воздуха); 3 — водомасляный теплообменник (охлаждение масла); 4 — водо-водяной теплообменник (система охлаждения двигателя); 5 — водогазовый теплообменник; 6 — водо-водяной теплообменник потребителя; 7 — автономный водяной насос системы утилизации

ного периода времени (суток, двое, трое и т. д) может оставаться неизменным и зависит от внешней температуры воздуха, его скорости, теплотехнических параметров материала, из которого изготовлено здание, и т. п.

Система отопления должна покрывать потери теплоты (теплопотери) помещениями через ограждающие конструкции, то есть через стены, окна, двери, пол, потолок. Эти теплопотери неизбежны, когда температура внутри помещения выше температуры наружного воздуха или смежных помещений. Величины этих потерь зависят от коэффициента теплопередачи, площади ограждаемых конструкций, соприкасающихся с наружным воздухом, и разности температур воздуха внутри помещения и снаружи.

Необходимую тепловую энергию для объекта или потребителя (или группы потребителей), обозначенную как  $\Sigma Q_{потр}$ , можно рассчитать с достаточной точностью (при необходимости проводится уточненный расчет по имеющимся методикам расчета теплопотерь зданий и сооружений на стадии проектирования или имеющегося сооружения) по формуле

$$Q_{потр} = q_o(t_b - t_n)V \cdot a, \quad (3)$$

где  $Q_{потр}$  — теплопотери зданием, ккал/ч; (при наличии группы зданий берется сумма теплопотерь от этих зданий);  $q_o$  — удельная тепловая характеристика, ккал/ч  $m^3 \cdot ^\circ C$  (берется из соответствующих таблиц);  $V$  — объем здания,  $m^3$  (по наружному обмеру определяется расчетом);  $a$  — коэффициент, учитывающий изменение удельной тепловой характеристики зданий в зависимости

от расчетной температуры наружного воздуха, (берется из соответствующих таблиц);  $t_b$  — температура внутри помещения, °С, зависит от назначения помещения; (жилое, производственное и т. д.) и берется из рекомендуемых таблиц;  $t_n$  — температура наружного воздуха, °С, зависит от климатической зоны эксплуатации объекта (помещения) и берется из рекомендуемых таблиц.

Теплота  $Q_{СКУТ}$ , которую можно получить от теплоэнергетического комплекса в составе ДВС и СКУТ, определяется как

$$\Sigma Q_{СКУТ} = Q_m + Q_{охл} + Q_r. \quad (4)$$

Данное количество теплоты должно использоваться в первую очередь, и если его не хватает для отопления конкретного объекта, то дополнительное количество тепловой энергии обеспечивает дополнительный источник теплоты — пиковый котел.

По имеющемуся графику электрических нагрузок потребителей можно определить количество теплоты, вырабатываемое системой утилизации за технологический цикл нагружения.

Составляющие количества теплоты  $\Sigma Q_{СКУТ}$  (уравнение 4) для выбранного источника электропитания объекта (при известном графике электрических нагрузок) в общем случае являются функцией эффективной нагрузки дизель-генератора. Поэтому для практических целей эти составляющие могут быть представлены регрессионными зависимостями вида  $Q = f(P_e)$

Так, например, для определения регрессионных зависимостей составляющих теплового баланса двигателя типа 6ЧН21/21 от его нагрузки были проведены экспериментальные исследования по определению этих параметров. Экспериментальные исследования проводились на дизель-генераторе мощностью 630 кВт и  $n = 1500$  об/мин и газовом двигатель-генераторе мощностью 500 кВт и  $n = 1000$  об/мин по специально разработанной программе на стендах ОАО ВДМ.

После определения статей теплового баланса и приведения их к нормальным условиям, были получены следующие зависимости для дизель-генератора:

$$\begin{aligned} Q_m &= -2,047 + 1,639P_e - 0,006P_e^2; \\ Q_{охл} &= 5,878 + 1,298P_e - 0,003P_e^2; \\ Q_r &= -18,647 + 1,452P_e - 0,002P_e^2; \end{aligned} \quad (5)$$

аналогично для газового двигатель-генератора:

$$\begin{aligned} Q_r &= 56,01 - 0,269P_e + 0,01P_e^2; \\ Q_{охл} &= 109,988 - 0,001P_e + 0,0002P_e^2; \\ Q_m &= 102,943 + 0,168P_e - 0,002P_e^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где тепловые и электрические мощности приведены в кВт.

Зная величины и зависимости теплопотоков от системы утилизации ДВС, в зависимости от нагрузки на ЭУ рассчитывается количество те-

плоты, получаемое от СКУТ на каждом режиме работы ЭУ. Это необходимо для расчета емкости теплового аккумулятора, который «сглаживает» изменение тепловой мощности при изменении электрической. В данном случае не учитывается тепловая инерция СКУТ, так как она будет примерно одинаково влиять на систему отопления при набросе и сбросе электрической нагрузки на ЭУ.

При отсутствии данных по изменению статей теплового баланса для конкретного двигателя можно принять их по имеющимся данным двигателя-аналога или близкого по конструктивным и удельным параметрам.

Рассчитать среднюю эксплуатационную тепловую мощность можно по известному значению средней эксплуатационной электрической мощности ДВС или его аналога по данному режиму работы.

Расчет количества тепловой энергии, которое должен дополнить потребитель при его нехватки от СКУТ, определяется как:

$$Q_{дйт} = \Sigma Q_{потр} - \Sigma Q_{СКУТ}. \quad (7)$$

Эта величина является переменной и также зависит от электрической нагрузки на ДВС. Как уже отмечалось ранее в данной работе, приоритетной для первоиспользования является теплота, полученная от СКУТ и затем уже от ДИТа (пикового котла) — этот алгоритм закладывается в систему автоматики всего теплоэнергетического комплекса.

Полную мощность ДИТа рекомендуется принимать равной тепловой мощности системы отопления, что гарантирует отсутствие возможности размораживания системы отопления при минимальной в данной климатической зоне температуре наружного воздуха в случае аварийного выхода из строя ДВС или СКУТ.

Таким образом, разработанный алгоритм и методика расчета количества теплоты, получаемой от теплоэнергетического комплекса за счет применения утилизации теплоты ДВС, позволяет:

- значительно сократить время расчета количества теплоты для обеспечения объекта от системы утилизации теплоты ДВС, а также варьируя значениями, входящими в этот расчет, дает возможность подобрать рациональные параметры теплообменного оборудования, входящего в СКУТ;
- ввести в алгоритм системы автоматики приоритетность использования теплоты от СКУТ;
- разработать алгоритм и техническое задание на систему автоматики теплоэнергетического комплекса в составе ДВС и СКУТ, непосредственно связанных с объектом потребления теплоты;
- рассчитать экономический эффект на стадии проектных предложений или разработки

бизнес-плана от применения теплоэнергетического комплекса в составе ДВС и СКУТ для отопления объекта потребителя с учетом климатической зоны эксплуатации объекта и реальных режимов работы ДГ по электрической нагрузке.

➤ полученные регрессионные зависимости статей теплового баланса двигателей в зависимости от его нагрузки или вида топлива позволит подобрать рациональные параметры теплообменного и другого оборудования, входящего в состав когенерационной, тригинирационной и комбинированной энергетической установок.

#### Литература

1. Агафонов А.Н., Сайданов В.О., Гудзь В.Н. Комбинированные энергоустановки объектов малой энергетики. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2005. — 262 с.
2. Андрущенко А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок. — М. : Высшая школа, 1985. — 319 с.

3. Ливенцев Ф.Л. Высокотемпературное охлаждение поршневых двигателей внутреннего сгорания. — Л. : Машиностроение, 1964. — 192 с.

4. Петриченко Р.М. Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания. — Л. : Машиностроение, 1975. — 224 с.

5. Разуваев А.В. Поршневые двигатели внутреннего сгорания с высокотемпературным охлаждением. — Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2001. — 128 с.

6. Агафонов А.Н., Разуваев А.В. Совершенствование характеристик энергетических установок на базе двигателей ЧН21/21 объектов малой энергетики. — Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. — 148 с.

7. Селиверстов В.И. Утилизация тепла в судовых дизельных установках. - Л. : Судостроение, 1973. — 218 с.

8. Кривов В.Г., Агафонов А.Н. Предложения по созданию комбинированных малых теплоэлектроцентралей на базе поршневых и газотурбинных двигателей с утилизацией теплоты // Двигателестроение. — 1998. — № 2. — С. 3–5.

ПАМЯТИ В.И. ТОЛШИНА



**19 ноября 2013 г. на 90 году жизни скончался доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, участник Великой Отечественной войны**

#### **Толшин Валерий Иннокентьевич**

Валерий Иннокентьевич Толшин после окончания с отличием в 1948 г. дизельного факультета Высшего Военно-морского инженерного училища им. Ф.Э. Дзержинского служил на кораблях ВМФ. Научная карьера В.И. Толшина началась в Ленинграде после окончания в 1958 г. с золотой медалью Военно-морской академии кораблестроения и вооружения по специальности «Корабельные энергетические установки». За время службы научным сотрудником сначала в Военно-морском научно-исследовательском институте и последующей научно-преподавательской деятельности в ВИТУ (Военно-инженерный технический университет) им были подготовлены и успешно защищены кандидатская и докторская

диссертации. Военный этап научно-технической карьеры д.т.н., профессора В. И. Толшина завершился в должности начальника кафедры «Двигатели и базовые машины» в Военно-инженерной академии им. В.В. Куйбышева.

После ухода в запас проф. В.И. Толшин преподавал различные дисциплины на кафедре «Автотракторные двигатели» МАДИ, а затем, в 1980 г., возглавил кафедру «Судовые энергетические установки и автоматика» Московской государственной академии водного транспорта (МГАВТ).

Основные результаты преподавательской и научной деятельности проф. В.И. Толшина опубликованы в учебниках и многочисленных монографиях и научных статьях: «Автоматизация энергетических установок» (ВИТУ, 1974 г.); «Автоматизация СЭУ» (МГАВТ, 2002 и 2004 г.); «Устойчивость параллельной работы дизель-генераторов» 1970 г.; «Переходные процессы в дизель-генераторах» (в соавторстве с Е.С. Ковалевским, 1972 г.); «Форсированные дизели. Переходные процессы. Регулирование», 1994 г.; «Режимы работы и токсичные выбросы судовых дизелей» (в соавторстве с В.В. Якунчиковым, 2002 г.). Под руководством В.И. Толшина в МГАВТ был оборудован для работы на природном газе и успешно прошел испытания пассажирский теплоход.

Профессором В.И. Толшиным было подготовлено 12 кандидатов технических наук по различным, в том числе специальным разделам применения ДВС. В течение многих лет он работал в составе диссертационного совета при МГАВТ, был членом УМО по специальности «Эксплуатация СЭУ» при Морской Государственной академии им. С.О. Макарова (Санкт-Петербург), работал сопредседателем межвузовского семинара по автоматическому регулированию ДВС при МГТУ им. Баумана, поддерживал творческие связи с предприятиями дизелестроения и пароходства, был постоянным автором научных публикаций в журнале «Двигателестроение».

*Редакция журнала «Двигателестроение», коллеги, сотрудники и студенты МГАВТ выражают искренние соболезнования родным и близким в связи с кончиной известного ученого, проф. В. И. Толшина.*