

## ОПЫТ СОЗДАНИЯ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ДВС

В.О. Сайданов, д.т.н., проф.; М.А. Антипов, инж.; В.В. Божко, инж.  
ФГОУ ВПО «Военный инженерно-технический университет»

Представлены результаты комплекса НИОКР, выполненных кафедрой Двигателей и энергетических установок ФГОУ ВПО ВИТУ, по разработке типового ряда когенерационных установок электрической мощностью от 60 до 1000 и тепловой от 80 до 1200 кВт на базе отечественных ДВС. Проведен анализ новых схемных решений когенерационных установок и предложены рекомендации по их использованию с конкретными типами двигателей.

В настоящее время в малой энергетике все большее распространение получают энергетические установки с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС), оборудованные системами утилизации теплоты. Такие установки, работающие как на дизельном топливе, так и на газом, предназначены для совместной выработки электрической энергии и теплоты. Их принято называть мини-ТЭЦ или когенерационными энергоустановками (от английского «cogeneration» — совместное производство). Когенерационная энергоустановка (КЭУ) вырабатывает электроэнергию и теплоту в соотношении ~1:1,2 [1, 2].

Сегодня в практике децентрализованного энергоснабжения объектов малой энергетике в России используются в основном газопоршневые и дизельные энергоустановки, в том числе и КЭУ иностранного производства, которые постепенно вытесняют с рынка отечественные

энергоустановки, работающие, как правило, без утилизации теплоты.

Специалистами ВИТУ в кооперации с ведущими отечественными проектно-конструкторскими организациями и двигателестроительными предприятиями разработан типовой ряд КЭУ на базе отечественных ДВС (табл. 1) [1].

КЭУ состоит из двух частей: электрогенерирующей и теплогенерирующей. В состав электрогенерирующей части входит собственно базовая энергетическая установка с поршневым ДВС, а в состав теплогенерирующей — система комплексной утилизации теплоты (СКУТ) ДВС.

СКУТ — комплекс функционально связанных технических устройств, которые предназначены для нагрева теплоносителя за счет использования теплоты отработавших газов, охлаждающей жидкости, моторного масла и наддувочного воздуха (для ДВС с газотурбинным наддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха).

Теплопроизводительность (тепловая мощность) СКУТ в общем случае определяется по формуле

$$Q_{\text{СКУТ}} = (q_{\text{ог}}\alpha_{\text{ог}} + q_{\text{охл}}\alpha_{\text{охл}} + q_{\text{м}}\alpha_{\text{м}} + q_{\text{н.в}}\alpha_{\text{н.в}})BQ_{\text{нр}}, \quad (1)$$

где  $q_{\text{ог}}$ ,  $q_{\text{охл}}$ ,  $q_{\text{м}}$ ,  $q_{\text{н.в}}$  — относительные составляющие потерь теплоты, уходящей с отработавшими газами, охлаждающей жидкостью, моторным маслом и наддувочным воздухом ДВС;  $\alpha_{\text{ог}}$ ,  $\alpha_{\text{охл}}$ ,  $\alpha_{\text{м}}$ ,  $\alpha_{\text{н.в}}$  — коэффициенты использования потерь теплоты, уходящей с отработавшими газами, охлаждающей жидкостью, моторным маслом и наддувочным воздухом ДВС;  $B$  —

Таблица 1

Типовой ряд когенерационных энергоустановок на базе отечественных ДВС

Электрическая мощность, кВт	Тепловая мощность, кВт	Тип станции	Тип двигателя	Предприятие-изготовитель
60	80	АД-60	6Ч13/14	ООО «Президент Нева Энергетический Центр», Санкт-Петербург
100	120	АД-100	8Ч13/14	То же
			6Ч15/18	ОАО «Барнаултрансмаш», г. Барнаул
200	240	АД-200	8ЧН14/14	ООО «Президент Нева Энергетический Центр», Санкт-Петербург
			12Ч15/18	ОАО «Турбомоторный завод», Екатеринбург
520	600	ДГР-520	6ЧН21/21	ОАО «Волжский дизель им. Маминых», г. Балаково
630	720	ДГР-630	6ЧН21/21	То же
1000	1200	ЭД8	12ЧН26/26	ОАО ХК «Коломенский завод», г. Коломна

Таблица 2

**Пределы изменения составляющих потерь теплоты ДВС на режиме номинальной мощности**

Обозначение составляющих потерь теплоты	$q_{ог}$	$q_{охл}$	$q_{м}$	$q_{н.в}$
Значения, %	35...45	25...35	3...6	3...6

часовой расход топлива ДВС;  $Q_{нр}$  — низшая теплотворная способность топлива ДВС.

Пределы изменения относительных составляющих потерь теплоты ДВС типового ряда КЭУ представлены в табл. 2.

При этом  $\alpha_{охл} = \alpha_{м} = 1$ , так как технически возможно утилизировать всю теплоту, переданную охлаждающей жидкости и моторному маслу.

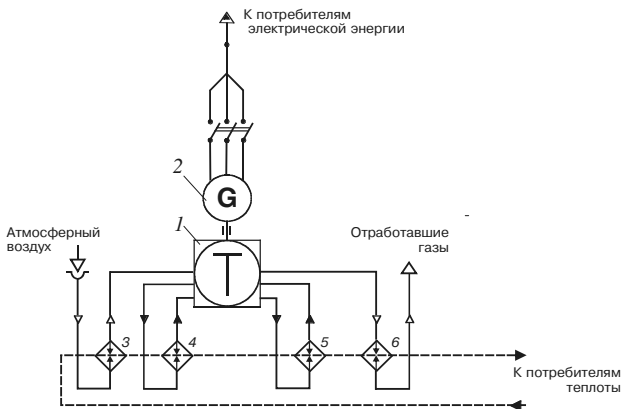
Значения  $\alpha_{ог}$  и  $\alpha_{н.в}$  всегда меньше 1, так как для утилизации всей теплоты, уносимой с отработавшими газами и наддувочным воздухом, необходимо охладить их до температуры окружающей среды, что технически сделать весьма непросто. Поэтому величины  $\alpha_{ог}$  и  $\alpha_{н.в}$  отражают степень совершенства теплообменного оборудования в составе СКУТ. Значения коэффициентов  $\alpha_{ог}$  и  $\alpha_{н.в}$  можно определить по следующим формулам:

$$\alpha_{ог} \approx 1 - t_{ог1}/t_{ог2}; \tag{2}$$

$$\alpha_{н.в} \approx 1 - t_{н.в1}/t_{н.в2}, \tag{3}$$

где  $t_{ог1}$ ,  $t_{н.в1}$ ,  $t_{ог2}$ ,  $t_{н.в2}$  — температуры отработавших газов и наддувочного воздуха на выходе и входе в соответствующие теплообменники-утилизаторы.

На рис. 1 представлена общая упрощенная схема КЭУ на базе ДВС, оборудованного СКУТ. Теплоноситель утилизационного контура потребителя теплоты последовательно проходит все утилизаторы, нагреваясь до расчетной температуры. Данная схема является идеализированной, так как она обеспечивает максимальную



**Рис. 1. Упрощенная схема когенерационной энергоустановки:**

1 — ДВС; 2 — электрический генератор; 3 — утилизатор теплоты наддувочного воздуха; 4 — утилизатор теплоты моторного масла; 5 — утилизатор теплоты охлаждающей жидкости; 6 — котел-утилизатор теплоты отработавших газов

глубину утилизации теплоты от всех рабочих сред (наддувочный воздух, моторное масло, охлаждающая жидкость, отработавшие газы). Вместе с тем максимально возможная глубина утилизации вызывает существенное усложнение технических систем ДВС, что приводит к снижению надежности функционирования последних и увеличению затрат на эксплуатацию.

При разработке технологических схем КЭУ для реальных ДВС, представленного в табл. 1 типового ряда, основным требованием является обеспечение надежной работы ДВС во всем диапазоне эксплуатационных режимов. Поэтому утилизаторы теплоты охлаждающей жидкости (а также моторного масла и наддувочного воздуха, если они включены в схемы) должны устанавливаться и функционировать совместно со штатными охладителями (радиаторами, если ДВС с радиаторным охлаждением), чтобы обеспечить оптимальный теплоотвод от рубашки охлаждения двигателя, а также моторного масла и наддувочного воздуха на любых режимах. В зависимости от конструктивных особенностей систем охлаждения и газовыпуска ДВС и алгоритмов совместного функционирования штатных охладителей ДВС и теплообменного оборудования СКУТ авторами были разработаны и запатентованы три базовые технологические схемы КЭУ (рис. 2–4) [3–5]. Каждая схема КЭУ может функционировать в трех режимах:

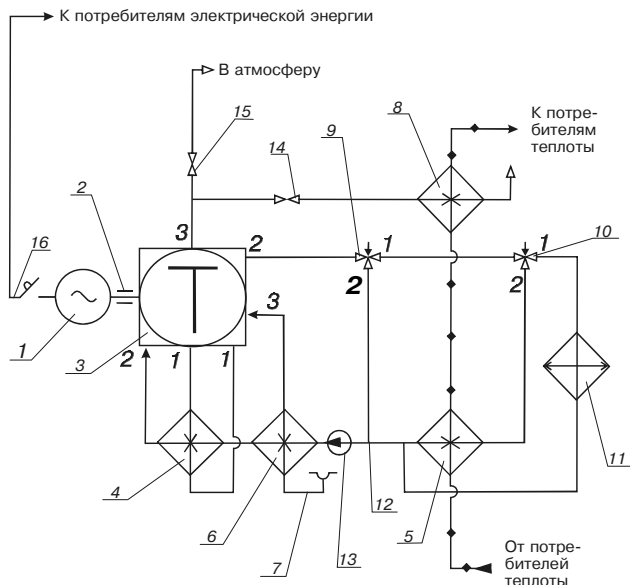
- 1) запуска и прогрева двигателя;
- 2) совместной выработки электрической энергии и теплоты для нужд потребителей;
- 3) выработки электрической энергии с отводом теплоты наддувочного воздуха, моторного масла, охлаждающей жидкости через штатный охладитель в окружающую среду.

Схема № 1 (рис. 2) была разработана для ДВС типа 12ЧН26/26. Ее несомненные достоинства следующие:

➤ включение охладителей наддувочного воздуха и моторного масла в контур системы охлаждения, т. е. отпадает необходимость в установке отдельных утилизаторов теплоты для этих сред, теплота наддувочного воздуха и масла отводится в систему охлаждения ДВС и следовательно утилизируется в теплообменнике 5;

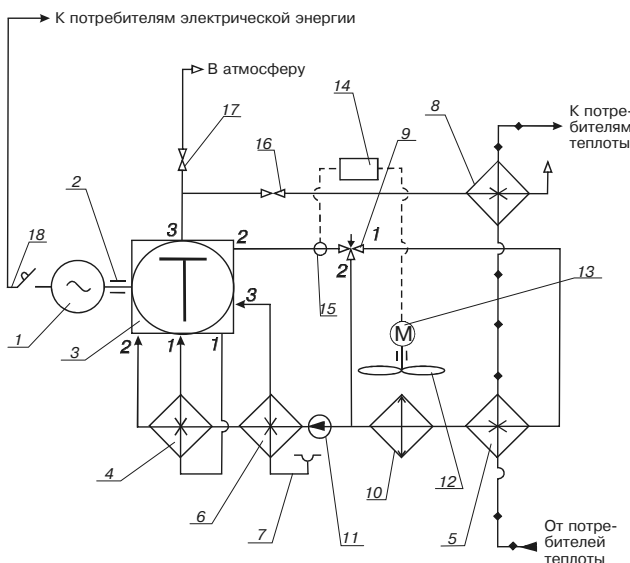
➤ отсутствие запорно-регулирующей арматуры для переключения охлаждения ДВС с утилизатора 5 на штатный охладитель (радиатор) 10. Перевод охлаждения ДВС осуществляется только включением привода вентилятора 12, что позволяет быстро и надежно выполнить эту процедуру с помощью средств автоматизации по команде датчика температуры 15.

Вместе с тем данная схема имеет и два недостатка, которые не позволили распространить



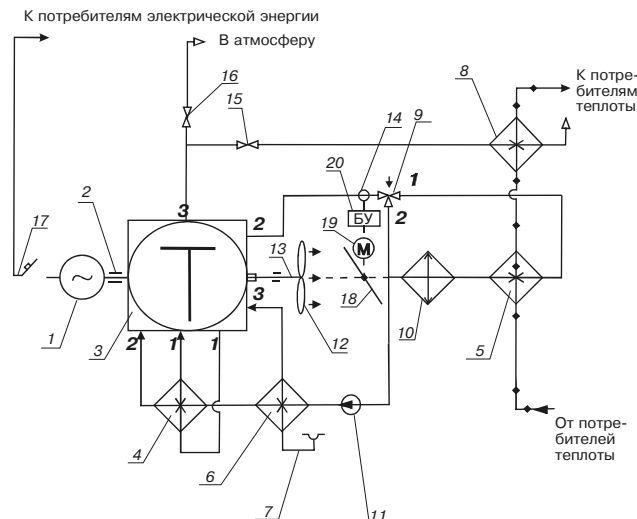
**Рис. 2.** Базовая технологическая схема КЭУ № 1:

1 — генератор с приводом 2; 3 — ДВС; 4 — теплообменник-охладитель моторного масла; 5 — теплообменник-утилизатор теплоты системы охлаждения; 6 — теплообменник-охладитель надувочного воздуха; 7 — воздухозаборник; 8 — теплообменник-утилизатор теплоты системы газовыпуска; 9, 10 — терморегулирующие клапаны; 11 — штатный охладитель системы охлаждения ДВС; 12 — точка подсоединения штатного охладителя; 13 — циркуляционный насос; 14, 15 — запорно-регулирующие органы (ЗРО); 16 — коммутационное устройство



**Рис. 3.** Базовая технологическая схема КЭУ № 2:

1 — генератор с приводом 2; 3 — ДВС; 4 — теплообменник-охладитель моторного масла; 5 — теплообменник-утилизатор теплоты системы охлаждения; 6 — теплообменник-охладитель надувочного воздуха; 7 — воздухозаборник; 8 — теплообменник-утилизатор теплоты системы газовыпуска; 9 — штатный терморегулирующий клапан; 10 — штатный охладитель (радиатор) системы охлаждения ДВС; 11 — циркуляционный насос; 12 — вентилятор; 13 — привод вентилятора; 14 — блок автоматического управления приводом вентилятора; 15 — датчик температуры; 16, 17 — запорно-регулирующие органы (ЗРО); 18 — коммутационное устройство



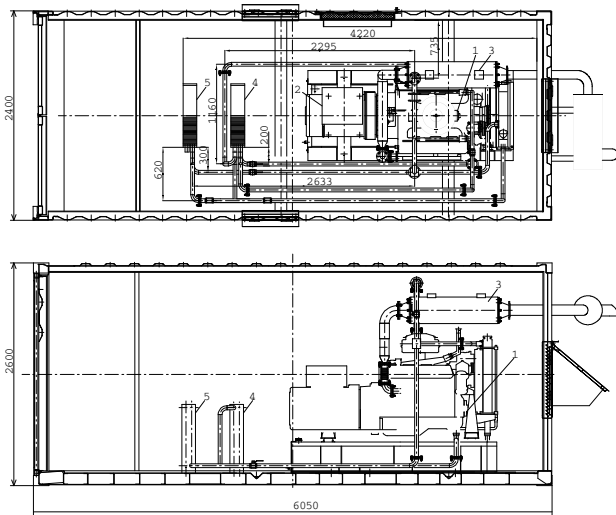
**Рис. 4.** Базовая технологическая схема КЭУ № 3:

1 — генератор с приводом 2; 3 — ДВС; 4 — теплообменник-охладитель моторного масла; 5 — теплообменник-утилизатор теплоты системы охлаждения; 6 — теплообменник-охладитель надувочного воздуха; 7 — воздухозаборник; 8 — теплообменник-утилизатор теплоты системы газовыпуска; 9 — штатный терморегулирующий клапан; 10 — штатный охладитель (радиатор) системы охлаждения ДВС; 11 — циркуляционный насос; 12 — крыльчатка вентилятора; 13 — вал вентилятора; 14 — датчик температуры; 15, 16 — запорно-регулирующие органы (ЗРО) вентилятора; 17 — коммутационное устройство; 18 — поворотная заслонка (жалюзи); 19 — привод заслонки; 20 — блок автоматического управления приводом заслонки

ее на другие ДВС типового ряда КЭУ. Во-первых, наличие автономного привода вентилятора охлаждения (от электродвигателя); во-вторых, гидравлическое сопротивление теплообменника-утилизатора 5 должно быть таким, чтобы напора и производительности штатного насоса 11 было достаточно для нормальной работы ДВС как при охлаждении с помощью утилизатора 5, так и с помощью штатного радиатора 10 при заданных параметрах окружающей среды. Уменьшение гидравлического сопротивления утилизатора приводит к возрастанию его массогабаритных показателей.

Для устранения первого недостатка для ДВС типов 6(8)Ч13/14, 8ЧН14/14 и 6(12)Ч15/18 была разработана схема № 2 (рис. 3). Реализация данной схемы не требует существенной конвертации ДВС (сохраняется привод вентилятора 13 от коленчатого вала ДВС), а для исключения возможного «переохлаждения» жидкости системы охлаждения радиатор 10 дооборудован управляемой заслонкой (жалюзи) 18 с приводом.

Для устранения второго недостатка для ДВС 6ЧН21/21 была разработана схема № 3 (рис. 4). В данной схеме теплообменник-утилизатор теплоты системы охлаждения 5 подключен параллельно штатному охладителю (радиатору) 11 через дополнительный терморегулирующий



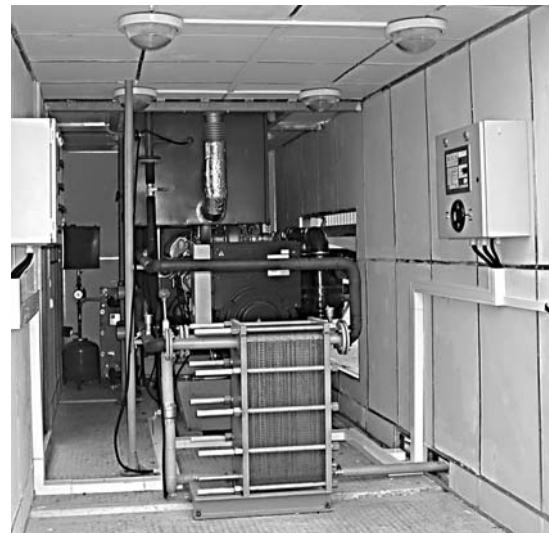
**Рис. 5. Компонировочное решение КЭУ на базе ДВС 8Ч13/14:**

1 — дизель; 2 — генератор; 3 — водогазовый утилизатор; 4 — водяной утилизатор; 5 — сетевой теплообменник

трехходовой клапан 10. Таким образом, были снижены требования по гидравлическому сопротивлению утилизатора 5, что позволило улучшить его массогабаритные показатели.

При реализации рассмотренных схем для ДВС в составе типового ряда КЭУ (см. табл. 1) в качестве теплообменников-утилизаторов теплоты жидкости системы охлаждения применялись типовые разборные пластинчатые теплообменники, которые характеризуются хорошими технико-экономическими и массогабаритными показателями, а также удобством в обслуживании. Теплообменники-утилизаторы теплоты отработавших газов ДВС — котлы утилизаторы водогрейные (КУВ) проектировались под конкретный двигатель с учетом его параметров. В настоящее время разработана конструкторская документация и созданы опытные образцы типоразмерного ряда КУВ для всех перечисленных в табл. 1 ДВС. При этом для ДВС 6(8)Ч13/14, 8ЧН14/14, и 6(12)Ч15/18 разработаны КУВ газотрубного типа, а для ДВС 6ЧН21/21 и 12ЧН26/26 — водотрубного [1, 2]. Последние имеют специальный механизм для выемки трубного пучка для чистки и ремонта, а также встроенные газорегулирующие заслонки, позволяющие изменять расход газов, проходящих в межтрубном пространстве.

В настоящее время наибольшее распространение в практике децентрализованного энергообеспечения объектов малой энергетики получили КЭУ, реализующие базовую технологическую



**Рис. 6. Внешний вид КЭУ 100/120 контейнерного исполнения**

схему № 2. На рис. 5, 6 в качестве примера представлено компоновочное решение и внешний вид КЭУ 100/120 на базе ДВС 8Ч13/14 в контейнерном исполнении, разработанной ООО «Президент Нева Энергетический Центр» при научном сопровождении кафедры двигателей и энергетических установок Военного инженерно-технического университета и выпускаемой серийно с 2005 г. Опыт эксплуатации таких установок на ряде объектов децентрализованной энергетики России, в том числе и в районах Крайнего Севера, подтверждает работоспособность и высокую надежность разработанной технологической схемы.

#### 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. Аверьянов В.К., Карасевич А.М., Сайданов В.О. и др. Системы малой энергетики. Современное состояние и перспективы развития; под ред. В. К. Аверьянова. — М.: ИД «Страховое ревю», 2008. — Т. 2. — 568 с.
3. Патент РФ 46049 U1 МПК F01N3/00. Энергетическая установка / В.О. Сайданов, А.Н. Агафонов, М.А. Антипов, Н.И. Олейник — Оpubл. 10.06. 2005, бюл. № 16.
4. Патент РФ 2280777 C1 МПК 7 F02G5/04 Энергетическая установка / В.О. Сайданов, А.Н. Агафонов, М.А. Антипов, Н.И. Олейник — Оpubл. 27.06.2007, бюл. № 21.
5. Патент РФ 2359143 C1 МПК 7 F02G5/04 Энергетическая установка / В.О. Сайданов, Н.И. Лудченко, М.А. Антипов, С.Н. Езерский — Оpubл. 20.06.2009, бюл. № 17.