

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КОМБИНИРОВАННЫХ УСТАНОВКАХ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С АКТИВНЫМИ КОТЛАМИ-УТИЛИЗАТОРАМИ

*А.В. Смирнов д.т.н., проф., ВИ(ИТ), Санкт-Петербург  
А.В. Бондарев, к.т.н., С.В. Александров, инженер  
ВА МТО, Санкт-Петербург*

Выполнены экспериментальные исследования автономной комбинированной установки выработки электроэнергии дизель-генератором и тепла активным котлом-утилизатором, работающим на твердом топливе. Утилизация тепла отработавших газов дизеля осуществляется за счет их подачи на вход котла высокотемпературного кипящего слоя.

Получены экспериментальные данные изменения коэффициента полезного действия котла, экономии топлива и коэффициента избытка кислорода в зависимости от объема отработавших газов, подаваемых в топку котла-утилизатора. Сравнение теоретических и экспериментальных данных представлено в графической форме и демонстрирует хорошую сходимость.

Энергоснабжение (тепло- и электроснабжение) муниципальных образований и ведомственных объектов, удаленных от централизованных электрических и тепловых сетей, а также сетей газоснабжения, осуществляется от автономных котельных и дизельных энергетических установок.

Одним из приоритетных направлений модернизации автономных систем тепло- и электроснабжения считается применение установок для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии.

Работа автономных комбинированных силовых установок для совместной выработки тепловой и электрической энергии характеризуется следующими важными функциональными и технологическими особенностями:

- тепловые нагрузки в несколько раз превышают электрические нагрузки;
- графики тепловых нагрузок определяются сезонными колебаниями температур наружного воздуха для систем отопления и суточными колебаниями в потреблении тепла и горячем водоснабжении;
- графики электрических нагрузок носят резко переменный характер и существенно отличаются от графиков тепловых нагрузок;

➤ в соответствии с тепловым балансом дизель-генератора можно утилизировать тепловой поток, примерно равный вырабатываемой электрической мощности;

➤ вырабатываемая тепловая мощность ДТЭС зависит от электрической мощности.

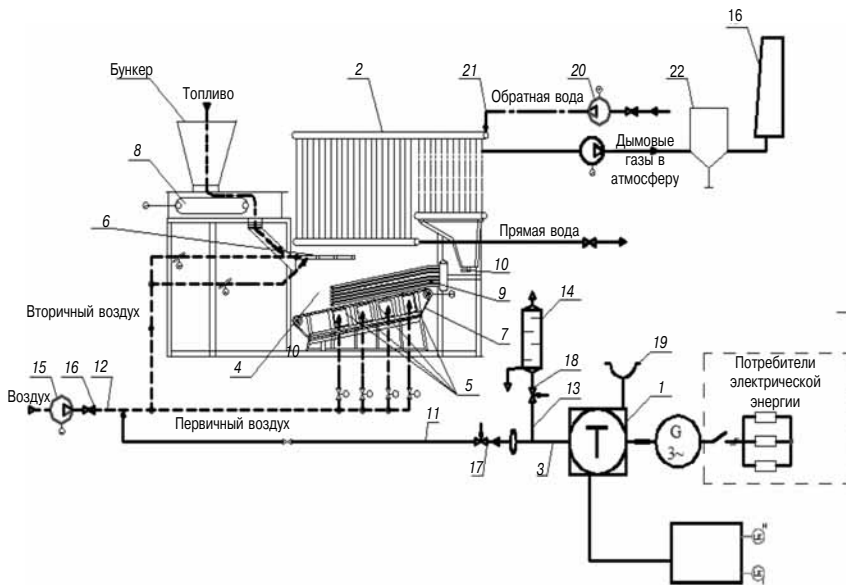
Одним из вариантов совместной выработки тепловой и электрической энергии является использование установки на базе дизель-генератора и активного котла-утилизатора (ДТЭС АКУ). В данной схеме предусмотрена подача отработавших газов дизеля с температурой около 400 °С и высоким содержанием кислорода в топку котла. При этом в котел с отработавшими газами вносится теплота и кислород для сжигания котельного топлива, что обеспечивает сокращение его расхода при обеспечении той же мощности, что и без утилизации и улучшается качество горения.

Одной из разновидностей ДТЭС АКУ является установка, в которой в качестве активного котла-утилизатора используется угольный котел высокотемпературного кипящего слоя [1, 2].

Теоретические исследования совместной работы комбинированной установки на базе котла-утилизатора высокотемпературного кипящего слоя КВП-1,74-ВТКС представлены в работе [3], в которой представлена математическая модель определения максимально возможного расхода отработавших газов дизеля, подаваемых в топку котла ВТКС. Расчетные значения коэффициента избытка кислорода в смеси воздуха и отработавших газов и оценка экономии котельного топлива на различных нагрузках представлены в виде графических зависимостей.

На основе результатов моделирования в теплоэнергетическом комплексе Военного института инженерно-технического Военной академии материально-технического обеспечения на кафедре двигателей и тепловых установок проведены пусконаладочные испытания и экспериментальные исследования совместной работы ДТЭС с АКУ на статических и динамических режимах.

Общая схема экспериментальной силовой установки с активным котлом-утилизатором



**Рис. 1. Экспериментальная установка с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя и дизель-генератором:**

1 — дизель-генератор; 2 — котлоагрегат с топкой высокотемпературного кипящего слоя; 3 — выпускной коллектор дизель-генератора; 4 — топочное устройство; 5 — дутьевые зоны первичного воздуха; 6 — дутьевые зоны вторичного воздуха; 7 — механическое топочное устройство с наклонной к горизонту подвижной колосниковой решеткой; 8 — питатель; 9 — поверхности нагрева; 10 — эжектор возврата уноса; 11 — газопускной патрубков котла-утилизатора; 12 — линия нагнетания дутьевого вентилятора; 13 — газоход перепуска отработавших газов в атмосферу; 14 — глушитель шума; 15 — дутьевой вентилятор; 16–18 — задвижки регулирования расхода сред; 19 — всасывающий коллектор; 20 — насос-котлового контура; 21 — трубопровод обратной воды; 22 — батарейный циклон; 23 — дымосос

высокотемпературного кипящего слоя и дизель-генератором представлена на рис. 1.

Топливо в топочное устройство 4 котла-утилизатора подается из бункера питателем топлива 8. Отработавшие газы (ОГ) дизель-генератора 1, содержащие кислород, через выпускной коллектор 3 и газопускной патрубков 11 подаются в топочное устройство котла-утилизатора 2, где их теплота передается нагреваемой воде и осуществляется дожигание продуктов неполного сгорания дизельного топлива.

Для создания высокотемпературного кипящего слоя дутьевым вентилятором 15 по линии нагнетания 12 воздух подается в воздуховод первичного воздуха, где смешивается с отработавшими газами дизель-генератора. Смесь ОГ и воздуха подается в дутьевые зоны первичного дутья 5 под подвижной колосниковой решеткой 7 для достижения эффекта псевдооживления.

Остальной воздух подается на вторичное дутье для дожигания несгоревших частиц топлива 6. Дымовые газы удаляются из котла-утилизатора дымососом через дымовую трубу 16 после очистки в батарейном циклоне.

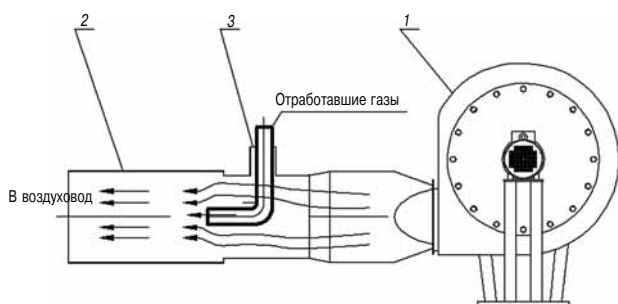
Количество воздуха и количество отработавших газов, подаваемых в топочное устройство, регулируется при помощи задвижек (16, 17). Ко-

личество отработавших газов, перепускаемых в атмосферу, регулируется устройством 18.

При работе дизель-генератора на установившемся режиме задвижка 16 частично открыта, обеспечивая постоянную работу дутьевого вентилятора и приток воздуха в топочное устройство. Задвижка 17 открыта, задвижка 18 закрыта, отработавшие газы, содержащие кислород, в полном объеме подаются в газопускной патрубков котла утилизатора, где в топочном устройстве происходит устойчивое горение твердого топлива. На переходных режимах работы дизель-генератора содержание кислорода в отработавших газах дизель-генератора сокращается, что может привести к ухудшению процесса горения топлива и остановке котла-утилизатора. Для исключения остановки АКУ открывается задвижка 16 на линии нагнетания и дутьевым вентилятором 15 в

топochное устройство подается дополнительный воздух на горение. Задвижка 18 открывается, перепуская отработавшие газы в атмосферу, а задвижка 17 закрывается. После выхода дизель-генератора на установившийся режим работы задвижка 17 открывается, задвижка 18 закрывается, и отработавшие газы поступают в топочное устройство, задвижка 16 частично закрывается, уменьшая подачу дополнительного воздуха в топочное устройство котла-утилизатора. Таким образом, в топочном пространстве 4 поддерживается требуемый коэффициент избытка кислорода, позволяющий осуществлять эффективное сжигание твердого топлива и надежную работу котла-утилизатора на неустановившихся режимах. Регулирование производится таким образом, чтобы объем подаваемой в топочное устройство искусственной газовой смеси (ИГС) не превышал объем воздуха, подаваемого при автономной работе котлоагрегата. [4].

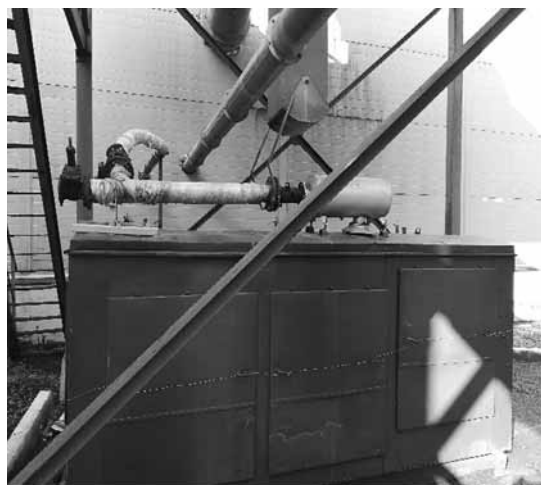
Для уменьшения противодавления на выпуске дизель-генератора и предотвращения режима, когда поток дутьевого воздуха «запирает» выпускной коллектор в месте врезки газохода в воздуховод первичного воздуха смонтирован узел смешения газов. Принципиальная схема узла смешения газов представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Схема узла смешения газов:**

1 — дутьевой вентилятор; 2 — воздуховод первичного воздуха; 3 — газоход отработавших газов

Газоход отработавших газов в месте врезки в воздуховод выполнен с изгибом в сторону движения первичного воздуха. В месте врезки образуется локальное сужение, что приводит к увеличению скорости движения первичного воздуха. На конце трубы узла смешения создается разрежение и отработавшие газы эжектируются в общий поток. Данное решение позволяет избежать «запирания» отработавших газов и затекания первичного воздуха в газоход при работе дизель-генератора на долевых нагрузках и холостом ходу.



**Рис. 3. Дизель-генератор с системой подачи отработавших газов в АКУ**



**Рис. 4. Узел смешения отработавших газов дизель-генератора с воздуховодом подачи воздуха в котел**

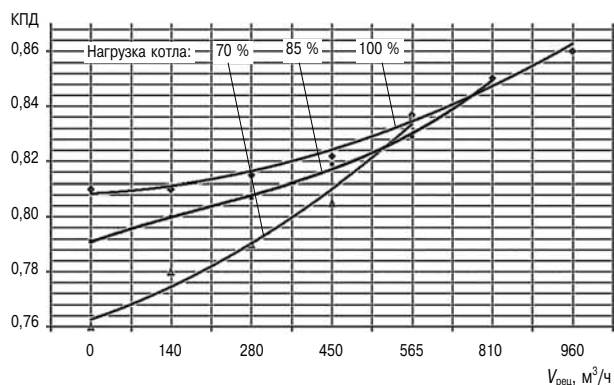


**Рис. 5. Приборы измерения расхода воздуха и отработавших газов**

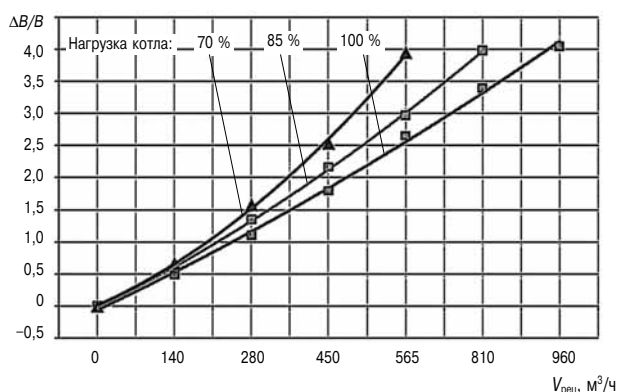
На рис. 3–5 представлена экспериментальная установка, включающая дизель-генератор АД-60/Т-400Р мощностью 60 кВт с узлом смешения отработавших газов и первичного воздуха.

Экспериментальные исследования на статических и динамических режимах с силовой установкой с активным котлом-утилизатором проводились при сжигании каменного угля с Моховского угольного разреза Кемеровской области calorificity 5221 ккал/кг, зольностью  $A^p = 11,1\%$ , влажностью  $W^p = 14,6\%$  и с фракционностью 10,25 мм.

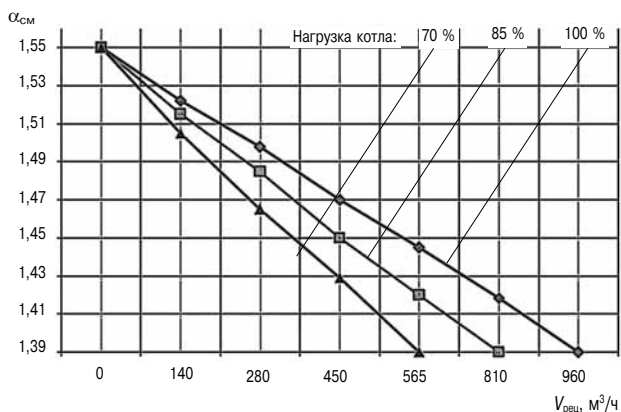
Для работы дизель-генератора использовалось дизельное топливо, соответствующее стандарту Евро-5.



**Рис. 6.** Изменение КПД котла от объема замещения воздуха отработавшими газами при различных нагрузках котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС



**Рис. 7.** Экспериментальные зависимости экономии твердого топлива  $\Delta B/B$  от объема замещения воздуха отработавшими газами дизель-генератора на различных нагрузках котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС



**Рис. 8.** Экспериментальные зависимости коэффициента избытка кислорода от объема замещения воздуха отработавшими газами дизель-генератора при различных нагрузках котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС

В рамках исследований проведено 4 серии экспериментов совместной работы силовой установки с АКУ на стационарных и переходных режимах при нагрузках 70, 85, 100 % с различным содержанием отработавших газов, подаваемых в топку котла на каждом режиме.

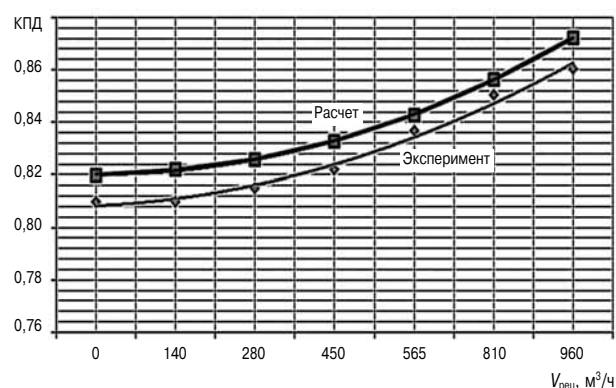
Графики зависимости коэффициента полезного действия (КПД), экономии котельного топлива, коэффициента избытка кислорода в зависимости от объема отработавших газов, подаваемых в топочное устройство на различных нагрузках, представлены на рис. 6–8.

Анализ полученных данных показывает:

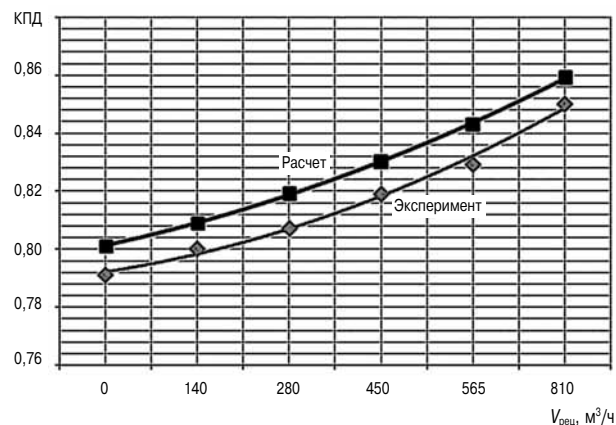
- КПД силовой установки находится в диапазоне от 76 до 86 % при нагрузках АКУ 70–100 %. На полной нагрузке котел устойчиво работает с объемом замещения воздуха отработавшими газами до 30 %;

- на всех нагрузочных режимах котла с увеличением объема подачи отработавших газов от дизель-генератора в топочное пространство АКУ, увеличивается экономия твердого топлива, достигающая максимального значения при 30 %-ном объеме подачи отработавших газов на каждом из режимов;

- на всех режимах работы котла максимальное снижение коэффициента избытка кислорода достигается при подаче отработавших газов в количестве 30 % от общего объема воздушной смеси и составляет 1,35. Дальнейшее снижение



**Рис. 9.** Изменение КПД котла от объема замещения воздуха отработавшими газами при нагрузке котла 100 %



**Рис. 10.** Изменение КПД котла от объема замещения воздуха отработавшими газами при нагрузке котла 85 %

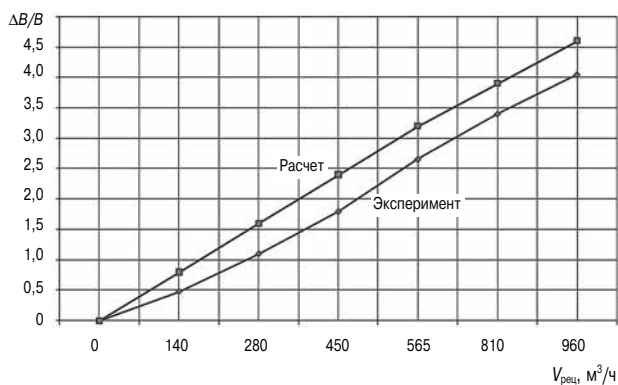


Рис. 11. Расчетная и фактическая зависимости экономии котельного топлива от объема подачи отработавших газов дизель-генератора в топку котла при нагрузке котла 100 %

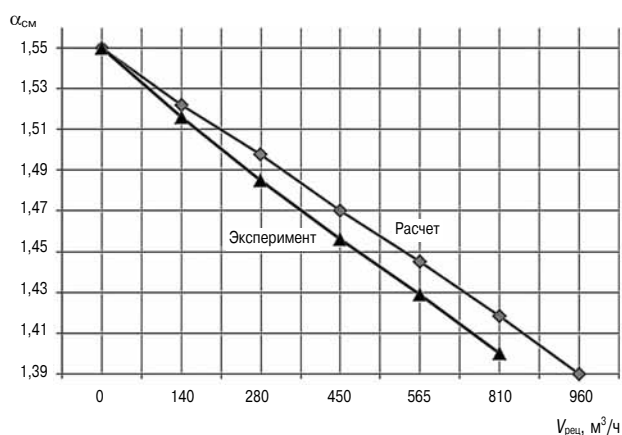


Рис. 12. Расчетная и фактическая зависимости коэффициента избытка кислорода от объема отработавших газов дизель-генератора при 100 % нагрузке котлоагрегата

этого показателя ведет к постепенному нарушению режима устойчивого горения.

На рис. 9–12 показаны расчетные и экспериментальные значения рабочих параметров комбинированной установки тепло-электроснабжения, которые показали удовлетворительную сходимость (расхождение не более 5 %).

Более низкие значения КПД котла, полученные экспериментальным путем, по сравнению с теоретическими обусловлены более низкой температурой отработавших газов, подаваемых в топочное устройство котла. Снижение температуры газов объясняется отклонением нагрузки дизель-генератора от нагрузки, принятой в расчетах (51,4 вместо 60,0 кВт). Дополнительные потери теплоты отработавших газов объясняются недостаточной толщиной теплоизоляции газоразводного тракта и отсутствием изоляции на глушителе и задвижках.

В результате проведенных пусконаладочных и экспериментальных испытаний удалось добиться экономичной и устойчивой работы комби-

нированной установки в диапазоне нагрузок от 70 до 110 %, при различных объемах подачи отработавших газов в АКУ. Экономия котельного топлива составляла до 4 %, КПД котлоагрегата при работе в составе комбинированной установки показал рост до 86 %, что на 4 % выше чем при автономной работе.

Экспериментальные показатели КПД и экономии топлива  $\Delta B/B$  незначительно (на 2 %) ниже расчетных показателей, что обусловлено неравномерной подачей топлива скребковым питателем, а также, в значительной мере, потерей теплоты отработавших газов дизель-генератора на участках газохода без тепловой изоляции (глушитель, задвижки).

### Выводы

1. Проведенные исследования показали возможность устойчивой работы комбинированной установки АД60-Т400-1Р мощностью 60 кВт с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя КВП-1,74 ВТКС.

2. Устойчивое горение топлива в котлоагрегате КВП-1,74 ВТКС при подаче на впуск отработавших газов дизель-генератора без шлакования решетки наблюдалось при оптимальном значении коэффициента избытка кислорода в пределах 1,3–1,6.

3. Максимальная экономия топлива комбинированной установки составляет 4 %.

4. Установлена возможность кратковременной устойчивой работы АКУ в случае подачи в топку 100 % объема отработавших газов, что подтверждает работоспособность котла без вентилятора при возникновении внештатных ситуаций.

### Литература

- Смирнов А.В., Бондарев А.В., Рода И.С., Карпов М.А. Практический опыт проектирования, строительства и реконструкции угольных котельных малой мощности по технологии высокотемпературного кипящего слоя // Инженерные системы. — 2006. — № 4 (25). — С. 8–12.
- Антонович Д.В., Юферев Ю.В., Смирнов А.В. Особенности работы котла-утилизатора с кипящим слоем на отходящих газах ДВС. В сб. «4-й международный по тепломассообмену». — Минск: Изд. ИТМО. Т. 3. — С. 105–107.
- Смирнов А.В., Бондарев А.В., Александров С.В., Болышев Э.В. К вопросу разработки дизельных теплоэлектростанций с активными котлами-утилизаторами высокотемпературного кипящего слоя // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 19–23.
- Смирнов А.В., Александров С.В., Бондарев А.В. Силовая установка с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя. Патент на изобретение. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 06.04.2018 г. № 2650018 С1, бюл. № 10.