

## РАЗРАБОТКА ДИЗЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С АКТИВНЫМИ КОТЛАМИ УТИЛИЗАТОРАМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

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

В статье представлен обзор технических решений конструкции силовой установки с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя. Разработана математическая модель и получены расчетные технические характеристики теплоэнергетической установки с подачей отработавших газов дизель-генератора в топочное устройство. Показана возможность экономии твердого топлива и снижения выбросов вредных веществ при сохранении тепловой мощности котла.

В настоящее время одним из приоритетных направлений модернизации систем тепло- и электроснабжения считается применение установок для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии.

Одним из вариантов применения данной технологии является использование комбинированных установок на базе дизель-генератора и активного котла-утилизатора (ДТЭС АКУ), где предусмотрена подача отработавших газов дизеля с температурой 400–450 °С и высоким содержанием кислорода в топку котла. При этом с отработавшими газами вносится теплота и кислород для сжигания котельного топлива, что обеспечивает экономию топлива при сохранении тепловой мощности котла. По данному направлению известны работы Скокова С.Н. и Юферева Ю.В. по разработке ДТЭС АКУ, в которых в качестве активного котла-утилизатора использовался котел на дизельном топливе [1–4].

В настоящей работе рассмотрены характеристики установки ДТЭС АКУ, в которой в качестве активного котла-утилизатора используется угольный котел высокотемпературного кипящего слоя (ВТКС), разработка и исследования которого в последние годы активно ведется специалистами научной школы профессора Смирнова А.В. [5].

Технология ВТКС позволяет обеспечить высокие экономические и экологические показатели котла:

- эффективность выгорания топлива в зависимости от его типа и конструкции топочной камеры составляет 95–98 %;

- коэффициент полезного действия котлоагрегата достигает 80–83 %;

- диапазон изменения нагрузки составляет 30–100 % за счет узкой наклонной подвижной решетки;

- обеспечивается снижение выбросов оксида азота за счет внутритопочных методов их подавления.

На кафедре двигателей и тепловых установок Военного института (инженерно-технического) — ВИ(ИТ) разработано новое техническое решение по созданию силовой установки с активным котлом-утилизатором, на которое получен патент на изобретение № 2650018. Принципиальная схема силовой установки представлена на рис. 1 [6].

Силовая установка с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя (ДТЭС АКУ ВТКС) включает в себя котлоагрегат с топкой высокотемпературного кипящего слоя 2, с наклонной к горизонту подвижной колосниковой решеткой 7, поверхностями нагрева 9, дутьевыми зонами первичного 5 и вторичного воздуха 6, питателем 8, эжектором возврата уноса 10. К впускному патрубку 11 котла-утилизатора 2 подключен дутьевой вентилятор 15, а к выпускной трубе 3 дизель-генератора 1 подключен газоход перепуска отработавших газов в атмосферу 13 с глушителем шума 14. На линии нагнетания 12 дутьевого вентилятора 15,

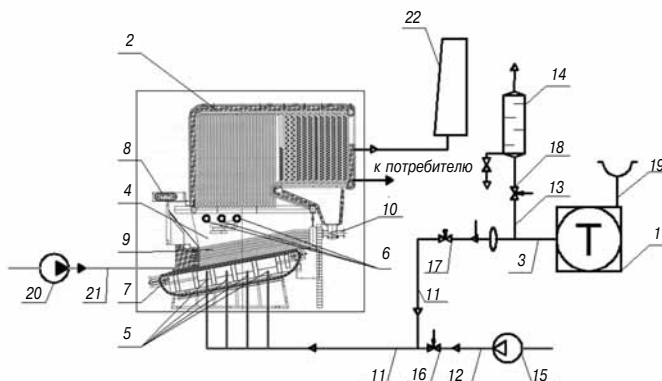


Рис. 1. Силовая установка с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя и дизель-генератором

газовпускном патрубке котла-утилизатора и на газоходе перепуска отработавших газов в атмосферу 13 установлены устройства регулирования расхода сред (задвижки) 16, 17, 18.

Для создания высокотемпературного кипящего слоя дутьевым вентилятором 15 по линии нагнетания 12 воздух подается в газовпускной патрубков 11, где он смешивается с отработавшими газами дизель-генератора и поступает в первичную 5 и вторичную 6 дутьевые зоны. Дымовые газы удаляются из котла-утилизатора через дымовую трубу 22.

Для оценки эффективности работы ДТЭС АКУ ВТКС необходимо учитывать две важные основные технологические особенности котла с топкой высокотемпературного кипящего слоя.

Первая особенность состоит в жестком ограничительном требовании по поддержанию гидродинамического режима кипящего слоя. При сжигании топлива в высокотемпературном кипящем слое добавление отработавших газов дизель-генератора в топочное устройство может существенно нарушить гидродинамику топочных процессов котлоагрегата. Например, для ДТЭС АКУ ВТКС, состоящей из котла КВП-1,74 ВТКС тепловой мощностью на номинальной нагрузке 1,74 МВт (1,5 Гкал/ч) и дизель-генератора АД-60/Т-400Р номинальной электрической мощностью 60 кВт подача отработавших газов в количестве 960 м<sup>3</sup>/ч (что составляет 30 % от объемного расхода дутьевого воздуха для котла) приведет к возрастанию скорости смеси воздуха и отработавших газов с 6,19 до 8,9 м/с.

При этом возможно нарушение устойчивого горения в кипящем слое. Частицы твердого топлива уносятся из объема топочного устройства и осаждаются в золоуловителе, что приводит к резкому увеличению потерь теплоты от механической неполноты сгорания унесенного топлива. Таким образом, для поддержания гидродинамики кипящего слоя и нормального режима горения топлива в котле расход первичного дутьевого воздуха необходимо уменьшить на величину, равную расходу отработавших газов дизель-генератора. При этом в топку котла будет подаваться газовая смесь, состоящая из дутьевого воздуха в объеме 2040 м<sup>3</sup>/ч и отработавших газов дизеля в объеме 960 м<sup>3</sup>/ч. То есть суммарный объемный расход смеси воздуха и отработавших газов должен быть таким же, как и расход первичного воздуха автономно работающего котла без дизеля.

Вторым принципиальным ограничительным условием совместной работы дизеля и АКУ ВТКС является ограничение по минимальному значению коэффициента избытка воздуха в топке котла. Очевидно, что при подаче в воздуховод

первичного воздуха определенного объемного расхода отработавших газов дизеля и одновременного снижения на эту величину объемного расхода дутьевого воздуха действительный объемный расход кислорода, поступающего в топку для горения, будет снижаться. Это обусловлено тем, что объемное содержание кислорода в отработавших газах дизеля составляет не более 10–11 %, в то время как содержание кислорода в дутьевом воздухе равно 21 %. В результате при подаче в топку смеси воздуха и отработавших газов дизеля следует ожидать снижения коэффициента избытка воздуха в топке котла. Данный фактор является положительным для устойчивости процесса горения твердого топлива в кипящем слое, так как при снижении коэффициента избытка воздуха будет снижаться температура горения и, как следствие, уменьшаться вероятность шлакования колосниковой решетки.

Вместе с тем существует ограничение по нижнему пределу коэффициента избытка воздуха, равному 1,15–1,2. При значениях ниже предельных резко увеличивается потеря теплоты от химической неполноты сгорания топлива. Поэтому возникает важная практическая задача оценки величины максимально возможного расхода отработавших газов дизеля, подаваемых в топку котла ВТКС, при котором будет обеспечено горение твердого топлива в кипящем слое с минимальным значением потерь теплоты от химической неполноты сгорания. Решение этой задачи позволяет определить величину максимально возможного внесения теплоты с отработавшими газами дизеля в топку котла ВТКС, и, как следствие, величину максимально возможной экономии котельного топлива.

Для определения максимально возможного расхода отработавших газов дизеля, замещающих часть дутьевого воздуха, предлагается следующая математическая модель.

Коэффициент избытка воздуха в топке котла ВТКС может быть определен по известной формуле:

$$\alpha = \frac{V_{\text{возд}}^{\text{д}}}{V_0}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{возд}}^{\text{д}}$ ,  $V_0$  — действительный и теоретически необходимый расход воздуха для сгорания 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг.

Формулу (1) можно записать в следующем виде:

$$\alpha = \frac{V_{\text{O}_2}^{\text{д}} + V_{\text{N}_2}^{\text{д}}}{V_{\text{O}_2}^{\text{т}} + V_{\text{N}_2}^{\text{т}}}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{O}_2}^{\text{д}}$ ,  $V_{\text{N}_2}^{\text{д}}$  — действительные расходы кислорода и азота в воздухе для горения 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;  $V_{\text{O}_2}^{\text{т}}$ ,  $V_{\text{N}_2}^{\text{т}}$  теоретически необходимые расходы

кислорода и азота в воздухе для горения 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;

Очевидно, что определить значение коэффициента избытка воздуха по формуле (1) для котла ВТКС в составе комбинированной установки ДТЭС АКУ ВТКС не представляется возможным, так как в топку котла подается не воздух, а смесь воздуха и отработавших газов дизеля. Поэтому для решения задачи предлагается использовать коэффициент избытка кислорода.

Тогда для котла ВТКС, работающего автономно на воздухе без дизеля, коэффициент избытка кислорода можно определить по формуле

$$\alpha_k = \frac{V_{O_2}^d}{V_{O_2}^T} \quad (3)$$

Коэффициент избытка кислорода в смеси воздуха и отработавших газов дизеля можно определить по формуле

$$\alpha_{k,см} = \frac{V_{O_2}^{д.смеси}}{V_{O_2}^T}, \quad (4)$$

где  $V_{O_2}^{д.смеси}$  — действительный расход кислорода в смеси на горение 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;

$$V_{O_2}^{д.смеси} = (1 - r) \cdot K_{O_2,возд}^d \cdot V_{см}^d + r \cdot K_{O_2,газов}^d \cdot V_{см}^d, \quad (5)$$

$$V_{O_2}^T = V_0 \cdot K_{O_2,возд}, \quad (6)$$

где  $K_{O_2,возд}^d$ ,  $K_{O_2,газов}^d$  — объемные доли содержания кислорода в воздухе (0,21) и в отработавших газах дизеля (0,1) по результатам газового анализа;

$$K_{O_2,возд}^d = \frac{V_{O_2,возд}^d}{V_{возд}^{рец.д}}, \quad (7)$$

$$K_{O_2,газов}^d = \frac{V_{O_2,газов}^d}{V_{газ}^{рец.д}}. \quad (8)$$

$r$  — степень замещения воздуха отработавшими газами, определяемая по формуле

$$r = \frac{V_{газ}^{рец.д}}{V_{см}^d}, \quad (9)$$

где  $V_{см}^d$  — расход смеси отработавших газов и воздуха.

$$V_{см}^d = V_{возд}^d = V_{газ}^{рец.д} + V_{возд}^{рец.д}, \quad (10)$$

$V_{газ}^{рец.д}$  — расход отработавших газов дизеля;  
 $V_{возд}^d$ ,  $V_{возд}^{рец.д}$  — расходы воздуха для котла в автономном режиме и в смеси с отработавшими газами дизеля.

Теоретически необходимый расход воздуха для горения твердого топлива составляет

$$V_0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p, \quad (11)$$

где  $O^p$ ,  $H^p$ ,  $S^p$ ,  $C^p$  — элементарный состав твердого топлива.

По формулам (4–11) для состава твердого топлива выполнены многовариантные расчеты коэффициента избытка кислорода для котла, работающего на смеси дутьевого воздуха и отработавших газов дизель-генератора АД-60/Т-400Р на номинальной нагрузке котла при значениях степени замещения воздуха отработавшими газами в диапазоне от 0 до 30 %.

Данные, приведенные на рис. 2, показывают, что при работе котла КВП-1,74 ВТКС в составе ДТЭС АКУ ВТКС предельно допустимое снижение коэффициента избытка кислорода в топке до 1,3 достигается при степени замещения воздуха отработавшими газами дизеля величиной, равной 30 %. Указанная степень замещения обеспечивается подачей отработавших газов

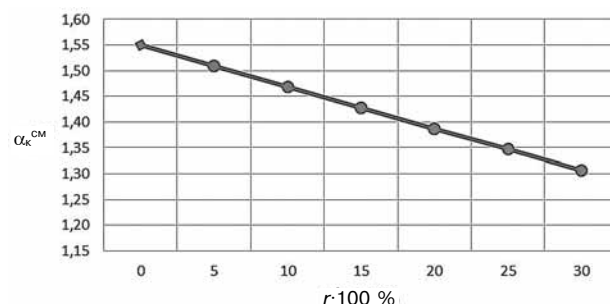


Рис. 2. Изменение коэффициента избытка кислорода α<sub>к</sub> от степени замещения воздуха отработавшими газами дизель-генератора мощностью 60 кВт для котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной нагрузке

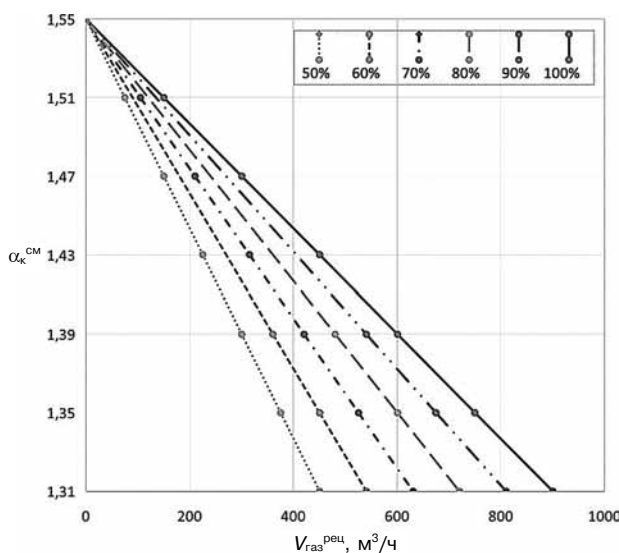


Рис. 3. Номограмма зависимостей коэффициента избытка кислорода α<sub>к</sub> от объема замещения воздуха отработавшими газами дизель-генератора мощностью 60 кВт для котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной и долевых нагрузках (от 50 до 100 %)

дизеля в объеме 900–960 м<sup>3</sup>/ч, что соответствует работе дизель-генератора АД-60/Т-400Р на номинальной нагрузке. Результаты расчетов показали, что при работе котла КВП-1,74 ВТКС в составе ДТЭС АКУ ВТКС на долевых нагрузках степень замещения воздуха отработавшими газами дизель-генератора АД-60/Т-400Р, работающего с максимальной нагрузкой 60 кВт будет избыточной и приведет к недопустимому падению коэффициента избытка кислорода с соответствующим увеличением потерь теплоты от химической неполноты сгорания твердого топлива.

На рис. 3 приведены результаты определения максимально допустимой подачи отработавших газов дизеля в трубопровод дутьевого воздуха котла КВП-1,74 ВТКС в составе ДТЭС АКУ ВТКС при его работе на долевых нагрузках.

По аналогичной методике можно рассчитать значения коэффициента избытка кислорода для рециркуляции уходящих газов котла КВП-1,74 ВТКС с исходным содержанием кислорода в

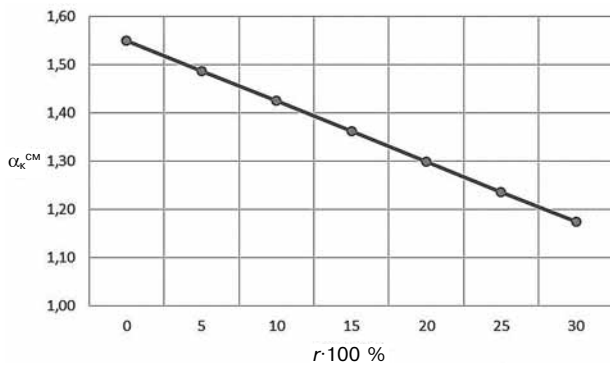


Рис. 4. Изменение коэффициента избытка кислорода  $\alpha_k$  от степени рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной нагрузке

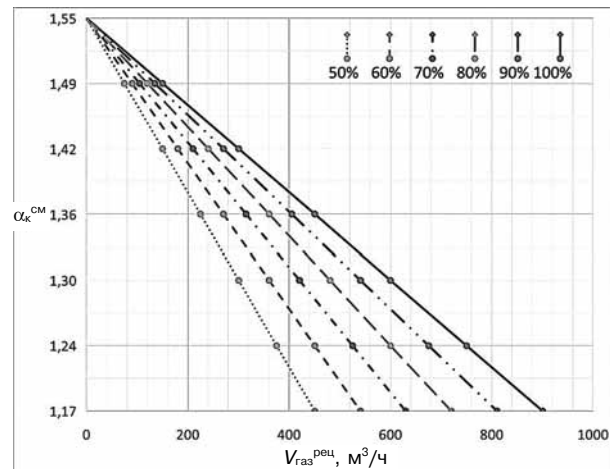


Рис. 5. Изменение коэффициента избытка кислорода  $\alpha_k$  от объемов рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС при работе на долевых нагрузках (от 50 до 100 %)

уходящих газах 4 %, а также значения объемов рециркуляции на номинальных и долевых нагрузках (от 50 до 100 %).

Результаты расчетов приведены на рис. 4, 5.

Для решения задачи оценки экономии котельного топлива при работе котла в составе ДТЭС ВТКС необходимо определить расход твердого топлива для котла ВТКС в автономном режиме и с замещением воздуха отработавшими газами дизеля.

Расход  $B_1$  твердого топлива с теплотой сгорания  $Q_p^H$  для котла ВТКС тепловой мощностью  $Q_1$ , работающего в автономном режиме определяется по формуле

$$B_1 = \frac{Q_1}{\eta_1 \cdot Q_p^H}. \quad (12)$$

При использовании котлоагрегата в составе ДТЭС с АКУ ВТКС выхлопные газы дизель-генератора в объеме  $V_r$  направляются в топку котла и вносят дополнительное количество теплоты  $Q_{г.вых}$ . Расход топлива котлом  $B_2$  при этом сокращается на величину, равную количеству топлива, при сжигании которого выделилось бы такое же количество теплоты, которое было внесено отработавшими газами ДВС. При этом КПД и тепловая мощность котлоагрегата остаются неизменными и равными  $\eta_1$  и  $Q_1$  соответственно.

Тогда расход топлива  $B_2$  при работе котла с замещением воздуха отработавшими газами дизеля можно определить по формуле

$$B_2 = \frac{Q_1 - Q_{г.вых}}{\eta_1 \cdot Q_p^H}, \quad (13)$$

$$Q_{г.вых} = V_r \cdot c \cdot t, \quad (14)$$

где  $c$  — средняя теплоемкость отработавших газов дизеля, ккал/м<sup>3</sup>/ч;  $t$  — температура отработавших газов дизеля, 450 °С.

Экономия  $\Delta B$  котельного топлива при работе котла ВТКС с замещением воздуха отработавшими газами дизеля можно определить по формуле

$$\Delta B = B_1 - B_2. \quad (15)$$

Если в формуле (15) заменить  $B_1$  и  $B_2$  их значениями из формул (12) и (13) соответственно, то величину  $\Delta B$  можно определить по формуле

$$\Delta B = \frac{Q_{г.вых}}{\eta_1 \cdot Q_p^H}. \quad (16)$$

В процентном выражении величину экономии котельного топлива при работе котла ВТКС совместно с дизелем можно определить по формуле

$$\Delta B\% = \frac{\Delta B}{B_1} \cdot 100\%. \quad (17)$$

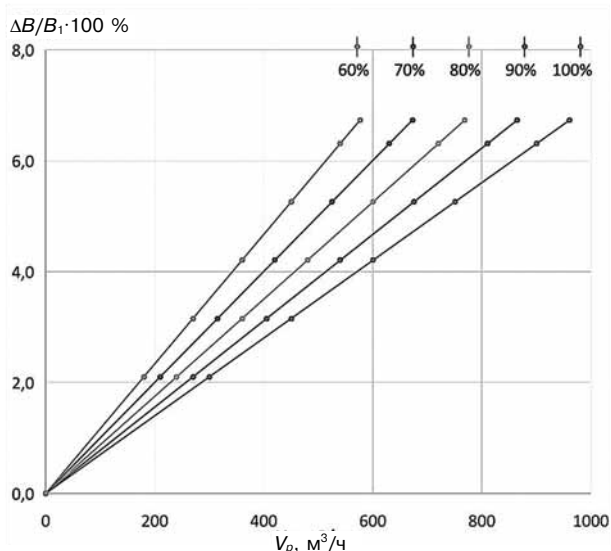


Рис. 6. Изменение экономии твердого топлива (в %) от объема замещения воздуха отработавшими газами при работе на номинальной и долевых нагрузках котла

Результаты расчетов экономии котельного топлива при работе котла КВП-1,74 ВТКС с замещением воздуха отработавшими газами дизель-генератора АД-60/Т-400Р приведены на рис. 6. Они показывают, что при работе ДТЭС АКУ ВТКС возможно получить экономию котельного топлива до 7 %.

На рис. 7 приведен аналогичный график зависимостей экономии котельного топлива (в %) от объема рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной и долевых нагрузках котла, из которого следует что экономия котельного топлива может составлять

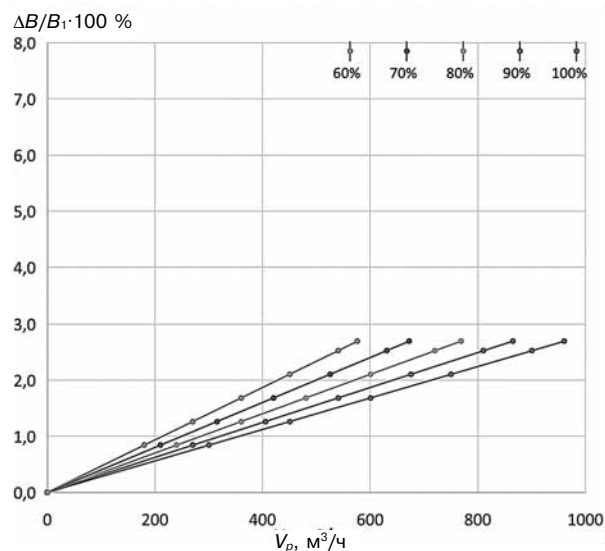


Рис. 7. График зависимостей процента экономии топлива котла от объема рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной и долевых нагрузках котла

до 2,8 %, что значительно ниже, чем при совместной работе котла и дизель-генератора. Это можно объяснить тем, что температура газов на выходе из котла составляет 180 °С, а на выходе из дизель-генератора — 450 °С.

Для подтверждения выполненных расчетов планируется провести экспериментальные исследования на установке ДТЭС АКУ ВТКС и на котле КВП — 1,74 ВТКС с рециркуляцией уходящих газов на учебно-исследовательской котельной на учебном полигоне ВИ(ИТ) ВА МТО.

### Литература

1. Юферев Ю.В., Смирнов А.В., Синатов С.А. Перспективы развития дизельных теплоэлектростанций с активными котлами-утилизаторами // Водоснабжение и санитарная техника. — 1991. — № 6. — С. 7–8.
2. Юферев Ю.В., Смирнов А.В., Синатов С.А. Оценка надежности дизельной теплоэлектростанции с АКУ. // Двигателестроение. — 1989. — № 2. — С. 17–19.
3. 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 конгресс по теплообмену». Минск: Изд-во ИТМО. — Т. 3. — С. 105–107.
4. Синатов С.А., Юферев Ю.В., Смирнов А.В. Перспективы развития дизельных теплоэлектростанций

с активными котлами утилизаторами. // Водоснабжение и санитарная техника — 1991. — № 6. — С. 7–8.

5. 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.

6. 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.