УДК 697.326.8

© В. А. Яковлев, канд. техн. наук, доцент

© А. В. Осипов, студент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: yakovlevspb@rambler.ru, osipov.gasent.2@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-173-180

© V. A. Yakovlev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© A. V. Osipov, student

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: yakovlevspb@rambler.ru, osipov.gasent.2@yandex.ru

РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ ТОПЛИВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЖАРОТРУБНОГО КОТЛОАГРЕГАТА ПРИ СЖИГАНИИ ДРЕВЕСНОЙ ЩЕПЫ

COMPUTATIONAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF THE FUEL MOISTURE INFLUENCE ON THE FIRE-TUBE BOILER UNIT EFFICIENCY AT WOOD CHIPS COMBUSTION

Представлен расчетно-теоретический анализ работы твердотопливного котлоагрегата, предназначенного для слоевого сжигания древесной щепы, с влажностью подаваемого топлива от 10 до 50 %. Рассмотрены основные особенности конструкции котлоагрегата, оборудованного экранированной топкой и двухходовым блоком с жаротрубными конвективными поверхностями нагрева, не оснащенных интенсификаторами турбулентного движения потоков продуктов сгорания. Рассмотрено влияние изменения влажности и режимов работы котлоагрегата на основные балансовые и режимные величины, отвечающие за тепловую эффективность и экономичность работы котлоагрегата.

Ключевые слова: сжигание древесной щепы, жаротрубный котлоагрегат, эффективность работы котлоагрегата, влажность топлива.

The article presents the results of a computational and theoretical analysis of the performance of the solid fuel boiler unit intended for wood chips combustion, the input fuel moisture content being of 10% to 50%. The authors consider the main design features of the solid fuel boiler unit equipped with a shielded furnace and fire-tube two-pass convective heating surfaces without turbulent movement intensifiers of combustion products. The influence of changes in the moisture content and the operating modes of the boiler unit on the main balance and operating values responsible for the thermal efficiency and economy of the boiler is analyzed.

Keywords: wood chips combustion, fire-tube boiler, boiler unit efficiency, fuel moisture content.

В настоящее время актуальным является вопрос о сокращении использования традиционных методов получения тепловой энергии, увеличения доли использования более дешевых местных видов энергетических ресурсов, в том числе и возобновляемых источников энергии. Среди широкого разнообразия веществ, используемых в качестве топлива, особое место занимает древесина. Этот ресурс в сравнении с другими видами твердого топлива по скорости естественного восстановления его природных запасов относится к возобновляемым источникам энергии. Древесину эффективно и безопасно можно сжигать в различных теплогенерирующих

установках коммунального и промышленного назначения. Зачастую существует отличная возможность быстрого и недорогого технического перевооружения эксплуатирующихся установок, оснащенных топками для слоевого сжигания топлива на сжигание древесины.

Древесина — ценный природный строительный материал естественного происхождения, состоящий из целлюлозы, поэтому централизованная добыча древесины для производства тепловой энергии крайне нежелательна и не рациональна. Однако использование древесных отходов, побочного продукта различных деревообрабатывающих производств, в качестве то-

плива — рациональное, технологически и экономически оправданное решение.

Вопросы, связанные с эффективным использованием тепловой энергии древесины для производства, рассмотрены в работах¹ [3–5].

При рассмотрении древесины как топлива важнейшим его энергетическим показателем является низшая теплота сгорания (теплотворная способность), которая в зависимости от поэлементного состава вещества вычисляется по зависимости Д. И. Менделеева¹, кДж/кг:

$$Q_H^P = 340C^P + 1030H^P - 109(O^P - S_{ор+к}^P) - 25,5W^P, \quad (1)$$

где C^P , H^P , O^P , $S_{ор+к}^P$, W^P — процентное содержание химических элементов рабочего состава топлива (углерода, водорода, кислорода, горючей серы (органической + колчеданной (пиритной)) и влаги соответственно.

Теплота сгорания органического топлива связана с его составом, где в случае с древесиной в зависимости от породы дерева как состав топлива, так и его теплота сгорания в абсолютно сухом состоянии изменяются незначительно (таблица) [5].

Основное влияние на активность процессов горения и величину низшей теплоты сгорания древесины оказывает влажность [4]. Влага в древесном топливе находится в основном в жидком состоянии, из-за чего при сжигании на процессы испарения влаги затрачивается существенная доля энергии, выделяющаяся в ходе реакций. Следовательно, количество теплоты, принимающей участие в теплообменных процессах котло-

агрегата в пересчете на 1 кг топлива, с увеличением влажности снижается.

В целях выявления влияния влажности древесного топлива на эффективность работы котлоагрегатов для теоретических исследований был принят жаротрубный котлоагрегат КВМщ-2,5 мощностью 2,5 МВт производства ООО «Балткотломаш-СПб», где, опираясь на методику теплового расчета котлов, рассмотренную в работах² [2, 6, 7, 8], проведен расчетный анализ их работы.

Конструкция котлоагрегата КВМщ-2,5 включает двухкамерную топку и расположенный над ней двухходовой блок жаротрубных поверхностей нагрева (рис. 1).

При проведении расчетно-теоретического анализа для выявления динамики изменения тепловой эффективности работы котлоагрегата в зависимости от влажности древесной щепы, опираясь на режимы работы существующих котельных, были выбраны экспериментальные нагрузки и три рабочих состава древесного топлива, отличающихся между собой различной влажностью — 10, 30 и 50 % соответственно. У большинства котельных, эксплуатирующихся на древесных отходах, топливо поступает с влажностью около 30 %, однако вследствие различного рода факторов, зависящих от условий транспортирования и хранения топлива, влажность может меняться.

На начальном этапе исследования был принят средний состав абсолютно сухой древесины, а далее, по уравнению (1), была получена зависимость низшей теплоты сгорания рабочего состава топлива от влажности в пределах 10–50 % (рис. 2).

² Тепловой расчет котлов (нормативный метод): изд. 3-е, перераб. и доп. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.

Состав пород древесины в абсолютно сухом состоянии

Порода древесины	Содержание элементов в древесине, %					Теплота сгорания, кДж/кг
	С	О	Н	N	Зола	
Лиственница	49,6	44,2	5,8	0,2	0,2	18 020
Сосна	50,2	43,3	6,1	0,2	0,2	18 630
Дуб	50,2	43,4	6,0	–	0,4	18 517
Ясень	49,2	43,9	6,3	–	0,6	18 432
Бук	49,0	44,3	6,1	0,1	0,5	18 114
Береза	48,9	44,6	6,1	0,1	0,3	18 049
Ель	50,3	43,06	6,2	0,04	0,4	18 794

¹ ГОСТ 147–2013 (ISO 1928–2009). Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания (с поправкой). Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 54 с.

Рис. 1. Водогрейный жаротрубный котел мощностью 2,5 МВт производства ООО «Балткотломаш-СПб» с наклонной колосниковой решеткой с топкой для сжигания древесной щепы: 1 — шнековый питатель; 2 — система подачи воздуха на горение; 3 — крышка конвективного блока; 4 и 5 — жаротрубный конвективный пакет второго и первого хода; 6 — радиационные поверхности нагрева топки; 7 и 8 — наклонные и горизонтальные колосники; 9 — радиационный излучающий свод; 10 — обслуживающие лючки с дверцами; 11 — окна для подачи воздуха на горение; 12 — патрубок для отвода продуктов сгорания в систему дымоудаления котельной

Рис. 2. Зависимость низшей теплоты сгорания от влажности топлива

На зависимости (рис. 2), записанной в виде расчетной формулы (1), очевиден линейный закон зависимости низшей теплоты сгорания от влажности топлива. Зависимость $Q_n^p = f(B_p)$ позволяет сделать вывод об очень сильном влиянии влажности на низшую теплоту сгорания древесного топлива.

Устанавливаемое в котельных теплогенерирующее оборудование в процессе эксплуатации подвергается регулированию отпуска тепловой энергии потребителям согласно утвержденным графикам. Переход на иной режим нагрузки обычно достигается регулированием расхода подаваемого на горение топлива. Опираясь на данные предельных мощностных нагрузок, были определены тепловые нагрузки котлоагрегата для проведения расчетно-теоретического исследования. Нагрузки выбирались от 30 до 120 % номинальной с шагом 10 %.

Переход с одного режима работы котлоагрегата на другой оказывает влияние на основные балансовые величины котлоагрегата: полезную тепловую мощность Q_1 , потери теплоты с уходящими газами Q_2 и потери теплоты через наружные ограждения Q_5 . Расчетными величинами, влияющими на Q_1 , Q_2 и Q_5 , являются температуры продуктов сгорания на выходе из топки и жаротрубных конвективных пакетов первого и второго хода. Температуры продуктов сгорания между теплообменными блоками котлоагрегата определялись по методике поверочного теплового расчета котлоагрегатов² отдельно для каждой теплообменной ступени котлоагрегата. Поставленная задача решалась методом последовательного приближения предварительно принимаемых значений (задаваемых «исходных» величин) с их расчетными значениями. Для удобства и достижения максимальной точности расчетных данных в офисном редакторе *Microsoft Excel* составлена расчетная программа с предусмотренной возможностью проводить вычисления основных балансовых величин и тепловых параметров в зависимости от изменяемых (назначаемых) эксплуатационных режимов работы котлоагрегата² [1].

При выполнении расчетно-теоретических исследований для определения динамики режимов подачи древесной щепы в топку котлоагрегата

древесной щепы использовалась зависимость расчетного расхода топлива B_p , кг/ч²:

$$B_p = \frac{Q_1}{0,01Q_p^p \eta_{бр}} \left(1 - \frac{q_4}{100}\right), \quad (2)$$

где q_4 — потери теплоты с механическим недожогом топлива, %; Q_1 — полезно используемая теплота (полезная тепловая мощность котлоагрегата), кДж/ч; Q_p^p — располагаемая теплота, вносимая в топку котлоагрегата, кДж/кг; $\eta_{бр}$ — коэффициент полезного действия (брутто), %.

Для исследования влияния влажности топлива и режимов работы котлоагрегата на его КПД использовалась зависимость обратного баланса², %,

$$\eta_{бр} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6, \quad (3)$$

где $q_2 - q_6$ — потери теплоты с уходящими газами, химическим недожогом, через наружные ограждения и выгружаемыми из топки золой и шлаком соответственно, %.

Для выявления влияния влажности топлива и режимов работы котлоагрегата на потери теплоты с уходящими газами q_2 , %, использовалась зависимость²

$$q_2 = \frac{(I_{уг} - (\alpha_{уг} - 1)I'_в) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) 100}{Q_p^p}, \quad (4)$$

где $I_{уг}$, $I'_в$ — энтальпия уходящих газов и окружающего воздуха соответственно, кДж/кг; $\alpha_{уг}$ — коэффициент избытка воздуха в уходящих газах.

Для выявления влияния влажности топлива и режимов работы котлоагрегата на величину тепловых потерь через наружные ограждения (обмуровку) котлоагрегата q_5 , %, использовалась зависимость²

$$q_5 = q_{5ном} \frac{Q_{1ном}}{Q_1}, \quad (5)$$

где $q_{5ном}$ — потери теплоты при номинальном режиме работы котлоагрегата, %; $Q_{1ном}$, Q_1 — номинальная и фактическая тепловая нагрузка котлоагрегата, кДж/ч.

Для выявления влияния влажности топлива и режимов работы котлоагрегата на суммарную величину тепловых потерь $\Sigma Q_{пот}$ использовалась зависимость²

$$\Sigma Q_{пот} = \frac{(q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) Q_p^p}{100}. \quad (6)$$

По результатам исследования согласно (2) были выявлены зависимости, представленные на рис. 3.

Учитывая технические особенности работы топок, предназначенных для слоевого сжигания, которые настраиваются на максимальный расход топлива, не превышающий 120 % номинального при 30 %-ной влажности топлива. Повышение расхода топлива выше 120 % номинального устанавливать не следует вследствие как возможного роста потерь теплоты Q_3 , Q_4 , так и иными, в том числе и эксплуатационными сложностями, связанными с увеличением времени выгорания топлива.

Увеличение влажности топлива для достижения требуемой тепловой мощности котлоагрегата требует увеличения его расхода, что, учитывая условия работы слоевых топок, расход древесной щепы с влажностью выше 30 % необходимо ограничивать величиной максимального расхода с влажностью 30 %. Такое решение объясняется снижением теплоты сгорания топлива вследствие отбора тепловой энергии на процессы испарения влаги, находящейся в топливе преимущественно в жидком состоянии. Повышение влажности древесной щепы с 30 до 50 % для поддержания тепловой мощности котлоагрегата требует увеличения расхода топлива примерно в 1,5 раза на всем диапазоне изменения тепловой мощности, что вследствие конструктивных

ограничений топки по максимальному расходу топлива не позволит котлоагрегату выйти на максимальные тепловые нагрузки, достижимые при эксплуатации на топливе с 30 %-ной и более низкой влажностью.

Снижение влажности топлива с 30 до 10 % способствует сокращению расхода топлива в 1,3–1,35 раза.

Влияние изменения режимов работы котлоагрегата на суммарную величину тепловых потерь $\Sigma Q_{\text{пот}}$, определяемую на основании уравнения (6), представлено на рис. 4, а, а на его КПД, найденного по зависимости (3), зависящего от суммы тепловых потерь, — на рис. 4, б.

На графиках отчетливо прослеживается достаточно сильное влияние влажности подаваемого на горение топлива на величину суммарных тепловых потерь и КПД, где при увеличении влажности с 30 до 50 % КПД снижается в среднем на 2,0–2,2 %. При снижении влажности с 30 до 10 % КПД увеличивается в среднем на 1,0–1,2 %. При снижении тепловой мощности ниже 40 % зависимость КПД показывает уменьшение величины, что объясняется ухудшением условий теплообмена при низких мощностных нагрузках. При более высоких нагрузках также наблюдается снижение КПД, что связано с ростом потерь теплоты с уходящими газами и, на практике, возможным увеличением химического недожога топлива.

Рис. 3. Зависимость влияния режимов работы котлоагрегата КВМщ-2,5 и влажности топлива на расход древесной щепы

Рис. 4. Зависимость влияния режимов работы котлоагрегата КВМЩ-2,5 и влажности топлива: а — на суммарную величину тепловых потерь; б — КПД (брутто) котлоагрегата

При анализе отдельных составляющих суммарных потерь теплоты, входящих в уравнение (6), замечен существенный рост тепловых потерь с уходящими газами как при увеличении тепловой нагрузки, так и с повышением влажности подаваемого на горение древесного топлива. Это приводит к снижению КПД и увеличению удельного расхода топлива на единицу полезной отпущаемой тепловой энергии.

Потери теплоты с уходящими газами q_2 при увеличении влажности щепы с 30 до 50 % увеличиваются в среднем на 1,8–2,0 %, а при снижении влажности с 30 до 10 % уменьшаются в среднем на 0,8–1,0 %. Такое явление объясняется увеличением расхода продуктов сгорания вследствие испарения содержащейся в топливе влаги, увеличивающей удельную объемную их долю в дымовых газах, а следовательно, и величину их теплосодержания, приходящуюся на 1 кг массы топлива. С увеличением нагрузки котлоагрегата во всех случаях наблюдается устойчивый рост тепловых потерь q_2 , что является следствием увеличения расходов продуктов сгорания в газах котлоагрегата.

В отличие от q_2 , потери теплоты через наружные ограждения q_5 снижаются и с увеличением нагрузки асимптотически стремятся к минимальным значениям.

При расчетно-теоретическом анализе температуры продуктов сгорания, двигающихся по газовому тракту котлоагрегата, использовались представленные эмпирические расчетные зависимости², а также алгоритм их нахождения методом последовательного приближения. После решения тепловой схемы котлоагрегата были

определены температуры продуктов сгорания на выходе из топki, на выходе из первого и второго жаротрубных конвективных пакетов и построены графические зависимости (рис. 5).

По зависимостям видно, что с увеличением тепловой мощности котлоагрегата наблюдается устойчивое повышение температуры продуктов сгорания как на выходе из топki, так и на выходе из первого и второго конвективных пакетов. Значения температур слабо зависят от влажности топлива, что объясняется совокупным влиянием (при достижении определенных мощностных нагрузок котлоагрегата) изменения расхода и температуры продуктов сгорания на значения коэффициентов теплопередачи, величины которых в итоге имеют схожие значения.

На основании проведенного расчетно-аналитического обзора изменения основных параметров работы жаротрубного котлоагрегата на древесной щепе со значениями влажности топлива 10, 30 и 50 % можно сделать ряд важных выводов.

1. Изменение влажности древесной щепы оказывает достаточно сильное влияние на теплоту сгорания, где с увеличением влажности теплота сгорания снижается практически по линейному закону. Увеличение влажности топлива требует для поддержания постоянной тепловой мощности котлоагрегата увеличения расхода топлива.

2. Изменение влажности подаваемого на горение топлива при условии сохранения тепловой нагрузки котлоагрегата влияние на значения температуры продуктов сгорания на выходе из теплообменных элементов котлоагрегата практически не оказывает.

Рис. 5. Зависимость влияния режимов работы котлоагрегата КВМщ-2,5 и влажности топлива на температуры продуктов сгорания на выходе из теплообменных блоков котлоагрегата

3. Увеличение влажности приводит к снижению КПД котлоагрегата преимущественно за счет увеличения потерь теплоты с уходящими газами q_2 , что связано с ростом их часовых расходов.

Библиографический список

1. Беднаржевский В. С., Добротина Г. Б. Алгоритмизация режимов теплового расчета котлоагрегатов // Известия Алтайского государственного университета. Барнаул: АлГТУ им. И. И. Ползунова, 2004. № 1 (31). С. 63–65.
2. Беднаржевский В. С., Оскорбин Н. М. Основные положения теплового расчета паровых котлов на ЭВМ // Теплоэнергетика. 2002. № 8. С. 48–50.
3. Зиганишина С. К., Кудинов А. А. Повышение экономичности котельных установок ТЭС и систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2016. № 8. С. 62–66.
4. Игнатьев В. С. Методические основы создания котлов малой теплопроизводительности на местных видах топлива // Материалы VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата / под ред. М. П. Лебедева. Якутск: Медиа-холдинг Якутия, 2013. С. 112–121.
5. Кудинов А. А., Зиганишина С. К. Энергосбережение в котельных установках ТЭС и систем теплоснабжения. М.: ИНФРА-М, 2016. 320 с.

6. Орлов А. А., Корчук Ю. А. Использование древесных отходов с различной влажностью в качестве топлива // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2007. №18. С. 125–127.

7. Павлюкова В. В., Картавская В. М. Выбор и тепловой расчет теплоутилизатора уходящих газов котлов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием: В 2 т.; под общ. ред. В. В. Федчишина. Иркутск: ИрГТУ, 2018. С. 276–281.

8. Ушаков С. Г., Муромкин Ю. Н., Шелыгин Б. Л. Тепловой поверочно-конструкторский расчет котлов с естественной циркуляцией. Иваново: ИГЭУ, 2004. 116 с.

References

1. Bednarzhevskiy V. S., Dobrotina G. B. *Algoritmizatsiya rezhimov teplovogo rascheta kotloagregatov* [Algorithmization of the modes of thermal calculation of boilers]. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Altai State University*, 2004, no. 1 (31), pp. 63–65.
2. Bednarzhevskiy V. S., Oskorbin N. M. *Osnovnye polozheniya teplovogo rascheta parovykh kotlov na EVM* [Basic provisions of thermal calculation of steam boilers on a computer]. *Teploenergetika – Heat Power Industry*, 2002, no. 8, pp. 48–50.

3. Ziganshina S. K., Kudinov A. A. *Povyshenie ekonomichnosti kotel'nykh ustanovok TES i sistem teplosnabzheniya* [Improving the efficiency of boiler installations of thermal power plants and heat supply systems]. *Teploenergetika – Heat Power Industry*, 2016, no. 8, pp. 62–66.

4. Ignat'ev V. S. *Metodicheskie osnovy sozdaniya kotlov maloy teploproduktivnosti na mestnykh vidakh topliva* [Methodological foundations for creating low-heat boilers based on local fuels]. *Trudy VI Evraziyskogo simpoziuma po problemam prochnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata* [Proceedings of the Eurasian Symposium on the problems of strength of materials and machines for cold climate regions]. Ed. by Lebedev M. P. Yakutsk, Media-Holding Yakutiya Publ., 2013, pp. 112–121.

5. Kudinov A. A., Ziganshina S. K. *Energoberezhenie v kotel'nykh ustanovkakh TES i sistem teplosnabzheniya* [Energy saving in boiler installations of thermal power plants and heat supply systems]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016, 320 p.

6. Orlov A. A., Korchuk Yu. A. *Ispol'zovanie drevesnykh otkhodov s razlichnoy vlazhnost'yu v kachestve topliva* [The use of wood waste with different moisture content as fuel]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa – Actual problems of the forest complex*, 2007, no. 18, pp. 125–127.

7. Pavlyukova V. V., Kartavskaya V. M. *Vybor i teplovoy raschet teploutilizatora ukhodyashchikh gazov kotlov* [Selection and thermal calculation of the boiler exhaust gas heat exchanger]. *Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation “Improving the efficiency of energy production and use in Siberia”]. In 2 vols. Ed. by Fedchishin V. V. Irkutsk, IrGTU Publ., 2018, pp. 276–281.

8. Ushakov S. G., Muromkin Yu. N., Shelygin B. L. *Teplovoy poverochno-konstruktorskiy raschet kotlov s estestvennoy tsirkulyatsiey* [Thermal verification and design calculation of boilers with natural circulation]. Ivanovo, IGEU Publ., 2004, 116 p.