

Энергоэффективность жаротрубных котлов в современных системах теплоснабжения

С.В. Овчинникова¹, А.А. Идрисова², В.В. Булатов³

*^{1,3} Кубанский государственный аграрный университет
им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар*

² Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

Аннотация: Энергетическая эффективность критически важна для обеспечения экономичности и надежности энергетической инфраструктуры в современных системах теплоснабжения. Постоянный мониторинг рабочих характеристик и их регулирование помогают снизить износ оборудования и увеличить срок его службы. В данной статье анализируются результаты расчетов, направленных на улучшение конструкции жаротрубных котлов, широко применяемых в сфере ЖКХ для генерации тепловой энергии. Важный акцент сделан на подборе тепловой нагрузки внутри топочного объема для достижения нужной температуры газов на выходе и высокоэффективного процесса горения с оптимальным уровнем избытка воздуха. Для изучения влияния теплового напряжения и пропорций топки на соотношение площадей поверхностей нагрева проверено расчетное сопротивление. Тщательно настроенные параметры процесса сгорания значительно уменьшают выбросы вредных веществ в атмосферу. Сокращение расхода топлива и оптимизация затрат на обслуживание техники способствует снижению операционных расходов.

Ключевые слова: Энергетическая эффективность, жаротрубный котел, теплоснабжение, тепловое напряжение, конструкция, ресурсосбережение.

В контексте растущего потребления энергетических ресурсов и увеличивающегося фокуса на экологической безопасности, оптимизация работы котельных установок становится особенно актуальной. Жаротрубные котлы, как предпочтительный выбор для обеспечения теплоснабжения, требуют детального рассмотрения в плане повышения их энергетической эффективности. Современные жаротрубные котлы выделяются благодаря уникальным конструкциям, которые способствуют значительному повышению коэффициента полезного действия (КПД) и минимизации затрат на обслуживание [1]. Благодаря их эргономичности, легкости в управлении и адаптации к разнообразным видам топлива, они обретают широкую популярность в многочисленных сферах, начиная от промышленного

производства и заканчивая системами коммунального обеспечения [2]. Однако, чтобы полностью раскрыть их потенциал, необходимо учитывать различные аспекты, включая оптимальные режимы эксплуатации котлов, виды топлива, а также внедрение систем автоматизации и мониторинга для бесперебойной и эффективной работы.

Особенности конструкции жаротрубного котла вызывают затруднения при расчете теплообмена как в конвективных поверхностях нагрева, так и в топке [3]. В основе большинства известных подходов лежит метод конечных элементов, который подразумевает установку специального программного обеспечения и требует значительного количества времени для задания граничных условий и проведения расчетов [4,5]. Данные обстоятельства ставят под вопрос применимость этих методов для выполнения оптимизационных задач, которые предполагают анализ и выбор из множества конструктивных решений [6]. Одна из конструкторских задач, не имеющих четкой методологии решения, – задача правильного определения объема топочной камеры [7,8]. За основу принята конструкция котла типа КСВ с горизонтальной цилиндрической прямоточной топкой и двумя ходами дымогарных труб [9,10].

Количество дымогарных труб первого и второго хода определяется по условию оптимальной скорости дымовых газов 10 м/с. Для расчетов принимаем рабочий состав газообразного топлива. В следующей последовательности производится расчет теплообмена в топке котла:

1. Выполняется расчёт геометрических параметров камеры сгорания.
2. Задается температурный баланс на выходе из топки Q_T'' .
3. Рассчитываются радиационные свойства продуктов сгорания.
4. Рассчитывается температурный баланс на выходе из топки Q_T'' .

5. Сравниваются температуры ϑ_T'' заданная в п. 2 и рассчитанная в п. 4 данного алгоритма, рассчитывается количество тепла, воспринятого в топке.

Представленный расчет выполняется с использованием метода последовательных приближений, основанный на методе хорд (рис. 1).

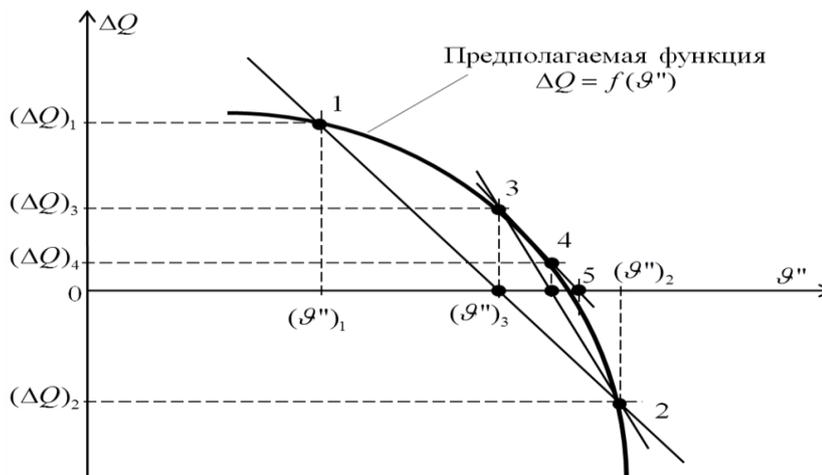


Рисунок 1 – Метод хорд

Длина топки L_f задается постоянной 3 метра, а диаметр топки D_f варьируется по четырем значениям: 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 метров. Таким образом получается четыре пропорции размеров топки: $L_f/D_f = 6; 4; 2$. Всего получается 24 расчетных эксперимента и в каждом выполняется поверочный расчет котла, в процессе которого подбирается количество дымогарных труб первого и второго хода по условию, что скорость дымовых газов должна составлять 10 м/с. Расчет каждой поверхности нагрева выполняется методом последовательных приближений. Изменение количества дымогарных труб в каждом расчете (по условию $w=10$ м/с) учитывается при определении диаметра трубы (1м) и длины поворотной камеры ($L_{п.к} = 0.4 \cdot D_{п.к}$, м), размеры которой должны быть учтены ранее в расчете топки. Соответственно, изменение количества дымогарных труб делает необходимым очередное уточнение теплового расчета топки. Все расчеты и

приближения были успешно автоматизированы с помощью программы MS Excel. Результаты показали, что во всех случаях КПД котла получается приблизительно одинаковым ~ 95–96%.

Общая протяженность дымогарных труб определяется по формуле:

$$\Sigma L_{дг} = L_{дг1} \cdot n_{дг1} + L_{дг2} \cdot n_{дг2}, \text{ м} \quad (1)$$

Общая площадь конвективных поверхностей нагрева составляет:

$$F_k = \pi \cdot d_{дг} \cdot \Sigma L_{дг}, \text{ м}^2 \quad (2)$$

Общая площадь радиационных поверхностей нагрева с учетом объема поворотной камеры между жаровой трубой и дымогарными трубами первого хода:

$$F_T = \pi \cdot D_T \cdot L_{дг2}, \text{ м}^2 \quad (3)$$

Общая площадь поверхностей нагрева котла:

$$F_{общ} = F_T + F_k, \text{ м}^2 \quad (4)$$

Проанализировав данные, мы установили, что доля конвективных площадей должна увеличиваться с ростом теплового напряжения топки. Однако увеличение соотношения длина/диаметр топки приводит к снижению необходимых конвективных площадей (рис.2).

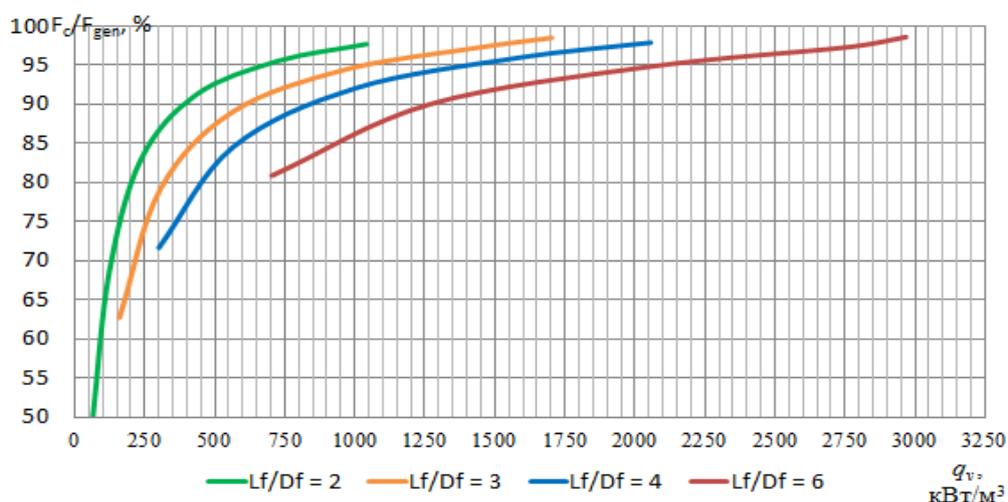


Рис. 2. - Результаты данных доли конвективных площадей

Показатель эффективности работы котла КПД характеризует эксплуатационные затраты. В ходе расчетных экспериментов КПД получился приблизительно одинаковым, в среднем ~95–96%. Показатель среднего теплового напряжения общей поверхности нагрева характеризует металлоемкость котла, а, следовательно, и капитальные затраты:

$$q_f = \frac{Q}{F_{\text{общ}}}, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \quad (5)$$

где Q – номинальная тепловая мощность котла, кВт.

Результаты расчета теплового напряжения общей поверхности нагрева отображены на графике (рис.3).

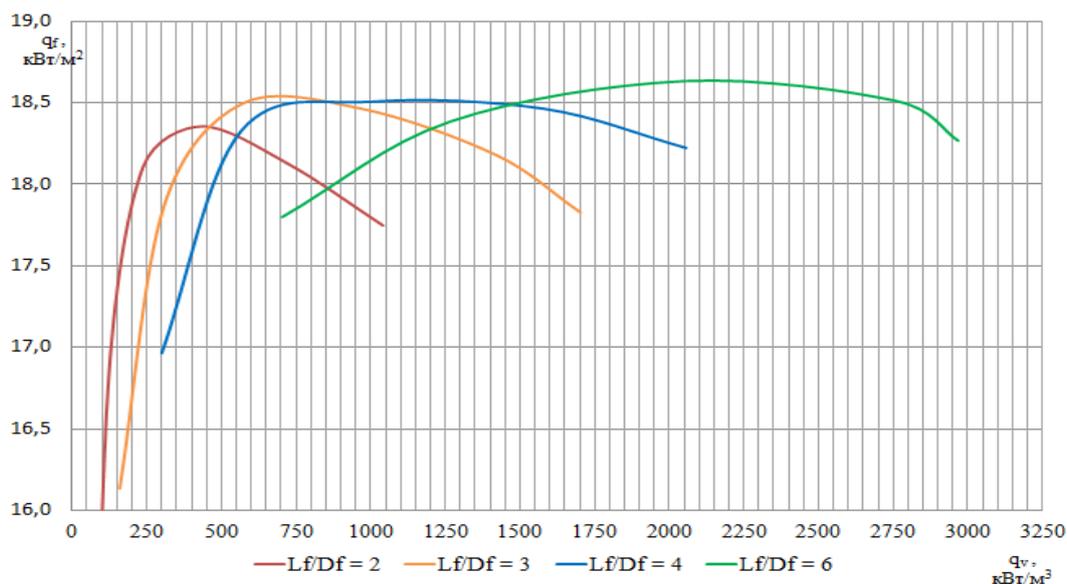


Рис. 3. - Тепловое напряжение общей поверхности нагрева

Анализ полученных данных показывает, что оптимальное тепловое напряжение топки котлов (точки экстремумов графиков) увеличивается с повышением соотношения длина/диаметр, так же увеличивается общая металлоёмкость котлов. По полученным расчетам и приведенным графикам для удобного практического использования полученных результатов их необходимо подвергнуть математической обработке.

Результаты исследования показателей котла от теплового напряжения топочного объема обрабатываются и систематизируются: определяются координаты точек экстремума (рис. 3) по каждому соотношению длина/диаметр 2; 3; 4; 6 жаровой трубы и получаем q_v , кВт/м³: 400; 650; 1000; 2100. В данном случае наиболее подходящий тип аппроксимации – экспоненциальный. По результатам обработки данных получена аналитическая зависимость:

$$q_v^{\text{опт}} = 184,08 e^{0,411 \frac{L_T}{D_T}}, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3} \quad (6)$$

Коэффициент детерминации R^2 равный 0,9958 очень близок к 1, что говорит о хорошем качестве описания экспериментальных данных. Полученная аналитическая зависимость позволяет рассчитывать величину оптимального теплового напряжения топки в зависимости от ее размеров: длины жаровой трубы и диаметра жаровой трубы в интервале соотношений от 2 до 6 для оптимизации ресурсэффективности.

Регулярное наблюдение за рабочими характеристиками и их корректировка способствуют минимизации износа техники, продлевая её эксплуатационный период. Аккуратно сконфигурированные параметры процесса сгорания существенно уменьшают эмиссию загрязняющих веществ в атмосферу. Минимизация потребления топлива и оптимизация расходов на обслуживание оборудования содействуют сокращению операционных затрат.

Литература

1. Sekisov A. N., Ovchinnikova S. V., Grebneva V., Chernyshova M. Modern directions of low-rise housing construction development in the world: economic and technological aspect // «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development» (CATPID-2020). 2020. P. 042035.

2. Фурсова И. Н., Дюжаков Д. В. Оценка эффективности использования теплоты шахтных вод для нужд централизованного теплоснабжения // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4-1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1166.
 3. Гончаренко Ю. Б. Опыт наладочных работ на жаротрубных водогрейных котлах // Современные технологии и развитие политехнического образования. 2015. С. 525-528.
 4. Волосатова Т. А. Основные вопросы энергоэффективности тепловых водяных котельных и варианты их решения // Инженерный вестник Дона. 2013. №№ 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1899.
 5. Кудрин Е. А. Жаротрубные водогрейные котлы. Их преимущества и недостатки // Наука, техника и образование. 2019. № 3 (56). С. 43-46.
 6. Хаустов С.А., Заворин А.С., Савченко Е.К. Анализ конструктивной схемы камеры горения с управляемым переходом в реализации аэродинамики от проточной до реверсивной // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 3 (95). С. 38-44.
 7. Ершкова Л. А. Энергетическая эффективность жаротрубных котлов в современных системах теплоснабжения // Вестник науки. 2024. Т. 1, № 6(75). С. 1634-1641.2024.
 8. Ovchinnikova S., Sekisov A., Abornev D., Kalinichenko M., Kalinichenko A. Optimizing the temperature stress for the furnace volume of a fire-tube boiler // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. № 1259. pp. 601-610.
 9. Сидорова Л. С. Сравнительный анализ жаротрубных котлов отечественного и импортного производства // Современные проблемы науки и образования. 2018. С. 54-56.
 10. Ширяев Р. Основные причины аварий жаротрубных котлов // Главный энергетик. 2011. №1. С. 30-32.
-

References

1. Sekisov A. N., Ovchinnikova S. V., Grebneva V., Chernyshova M. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development (CATPID-2020). 2020. pp. 042035.
2. Fursova I. N., Dyuzhakov D. V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012. № 4-1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1166.
3. Goncharenko YU. B. Sovremennyye tekhnologii i razvitiye politekhnicheskogo obrazovaniya. 2015. pp. 525-528.
4. Volosatova T. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1899.
5. Kudrin E. A. Nauka, tekhnika i obrazovaniye. 2019. № 3(56). pp. 43-46.
6. Khaustov S. A., Zavorin A. S. Vestnik nauki Sibiri. 2014. № 2(12). pp. 21-28.
7. Yershkova L. A. Vestnik nauki. 2024. T.1, № 6(75). pp. 1634-1641.2024.
8. Ovchinnikova S., Sekisov A., Abornev D., Kalinichenko M., Kalinichenko A. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. № 1259. pp. 601-610.
9. Sidorova L. S. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2018. pp. 54-56.
10. Shirayayev R. Glavnyj energetik. 2011. № 1. pp. 30-32.

Дата поступления: 28.10.2024

Дата публикации: 5.12.2024