

УДК 536.24

В. Н. КАЧАН, А. В. ЛУКЬЯНОВ, Е. В. КОНОПАЦКИЙ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЁТА ЭЛЕМЕНТОВ КОНВЕКТИВНОЙ ЧАСТИ ЖАРОТРУБНЫХ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ

Аннотация. Представлено математическое описание гидродинамических и массообменных элементарных событий процесса теплообмена на примере жаротрубного водогрейного котла ВК-34. Эти события объединены в математическую модель через баланс времени пребывания воды и продуктов сгорания и традиционный тепловой баланс в объёме котла, что упрощает процесс перерасчёта необходимого количества топлива и теплоносителя при изменении вида и качества топлива.

Ключевые слова: предварительный расчёт, математическая модель, конвективная часть, продукты сгорания, газ, теплоноситель, КПД теплопередачи, оптимизация.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Необходимость перерасчёта конструктивных элементов конвективного пучка возникает при проверочном расчёте любого котлоагрегата при замене топлива (его вида, химсостава, теплотворной способности). Проверочный и конструктивные расчёты проводятся обычно поэтапно после расчёта теплопередачи к воде в топочном пространстве и определении температуры отходящего газа из топки по ходу продуктов сгорания через фестон, конвективные пучки труб, экономайзер, воздухо- и водоподогреватели, каждый раз задаваясь температурой уходящего потока газа продуктов сгорания.

Пересчитывать приходится много раз, приближаясь к допустимой невязке, равной 0,5 % от Q_p^p в кДж [1]. Но даже при таких условиях во многих случаях необходимый размер невязки остаётся недосяжимым при одновременно заданных значениях расхода топлива и теплоносителя.

Вместе с тем требуемое значение невязки можно достичь, если оптимизировать расход топлива или теплоносителя в зависимости от необходимых эксплуатационных требований.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Обычно, согласно известным методикам разных авторов, в расчёте используется баланс теплоты в целом для всего котлоагрегата и даже не упоминается временной фактор. Например, в работах [2, 3].

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Расчёт конвективных элементов котлоагрегата является достаточно сложной технической задачей, основанной, как было сказано выше, на балансе теплоты. Суть новой методики заключается в том, что, кроме баланса теплоты, необходимо использовать баланс времени пребывания нагреваемой воды и продуктов сгорания топлива, а также в отдельных случаях балансы мощности, расходов теплоносителя и топлива.

Рассмотрим вариант предварительного расчёта конвективных элементов котла ВК-34 с использованием не только баланса теплоты, но и баланса времени пребывания теплоносителя (воды) и продуктов сгорания топлива по всей цепочке теплопередачи (в фестоне, конвективных пучках, экономайзере, водо- и воздухоподогревателях). Время пребывания воды в рамках объёма внутри котла всегда будет намного больше, чем время пребывания продуктов сгорания внутри котла, так как их

плотности отличаются почти на три-четыре порядка (воды с плотностью $1\,000\text{ кг/м}^3$ и дымовым газом с плотностью около $0,265\text{ кг/м}^3$ при температуре $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$) и более [4–6]. Поэтому внутрикотловой объём воды будет аккумулировать теплоту от десятков таких объёмов продуктов сгорания топлива, проходящих через котёл за время пребывания (нагрева) воды в котле:

$$\tau_{\text{преб.в}} \gg (\tau_{\text{преб.з.т}} + \tau_{\text{преб.з.к}}), \quad (1)$$

где $\tau_{\text{преб.в}}$ – время пребывания воды в котле, необходимого для нагрева её от 60 до $105\text{ }^\circ\text{C}$, с;
 $\tau_{\text{преб.з.т}}$, $\tau_{\text{преб.з.к}}$ – время пребывания продуктов сгорания мазута в топке и в конвективной части котла, с.

Более подробно эти балансы рассмотрим в математической форме на примере жаротрубного водогрейного котла ВК-34.

1. Баланс времени нахождения теплоносителя-воды и продуктов сгорания.

Такой баланс времени можно достичь только с учётом виртуального коэффициента выравнивания времени по формуле:

$$\kappa_{\text{вырав.}} = \tau_{\text{преб.в}} / (\tau_{\text{преб.з.т}} + \tau_{\text{преб.з.к}}). \quad (2)$$

Тогда уравнение (1) можно представить в виде:

$$\tau_{\text{преб.в}} = \kappa_{\text{вырав.}} (\tau_{\text{преб.з.т}} + \tau_{\text{преб.з.к}}). \quad (3)$$

2. Для достижения поставленной задачи составим уравнение секундного желаемого баланса теплоты для котла в целом, кДж:

$$Q_v = (Q_{z.t} + Q_{z.k}), \quad (4)$$

где $Q_{z.t}$ и $Q_{z.k}$ – это теплоты, переданные воде в топке и в конвективной части котла, кДж;
 Q_v – теплота, необходимая для нагрева теплоносителя-воды при его постоянном расходе
 $G_v = 11,1\text{ кг/с}$, равная:

$$Q_v = G_v (4,18 \cdot C_v) \Delta t_v \rho_v, \quad (5)$$

где C_v – теплоёмкость воды, равная $1,008\text{ ккал/(кг град)}$;
 $4,18$ – переводной коэффициент, кДж/ккал $^\circ\text{C}$.
 $\Delta t_v = 105 - 60 = 45\text{ }^\circ\text{C}$ – разность температур теплоносителя на входе и на выходе;
 ρ_v – плотность воды, равная $1\,000\text{ кг/м}^3$.

Баланс времени пребывания

А) воды в конвективной части:

$$\tau_{\text{преб.в}} = V_v / (S_{\text{меж.тр}} v_{v.\text{меж.тр}}), \quad (6)$$

где $S_{\text{меж.тр}}$ – живое сечение для прохода воды через конвективную часть котла, м^2 ;
 $v_{v.\text{меж.тр}}$ – скорость движения нагреваемой воды, м/с;
 V_v – объём воды в межтрубном пространстве, м^3 ; определяемый по формулам:

$$V_v = V_{\text{меж.тр}} + V_{\text{торц}} - V_{\text{тр.к}}, \quad (7)$$

$$V_{\text{меж.тр}} = \pi/4 \cdot [(D_{\text{вн.к}}^2 - D_{\text{н.т}}^2) \cdot L_{\text{к.тр}} + D_{\text{вн.к}}^2 L_{\text{торц}}] - V_{\text{тр.к}}, \quad (8)$$

где $D_{\text{вн.к}}$ и $D_{\text{н.т}}$ – соответственно внутренний диаметр конвективной части и наружный диаметр топки котла, м;

$L_{\text{к.тр}}$ и $L_{\text{торц}}$ – протяжённость конвективных трубок и толщина торцевой части котла, м;

$V_{\text{тр.к}}$ – суммарный объём конвективных трубок, м^3 .

Б) продуктов сгорания в топке:

$$\tau_{\text{преб.з.т}} = V_{z.t} / (S_{\text{вых.з.т}} v_{z.t.\text{сп}}), \quad (9)$$

где $S_{\text{вых.з.т}}$ – живое сечение выхода газа из топки, м^2 ;

$v_{z.t.\text{сп}}$ – средняя скорость движения газа в топке, м/с;

$V_{z.t.}$ – объём дымовых газов в топке, м^3 , который рассчитывается по формуле:

$$V_{z.m.} = V_m - V_{фак} + V_{вход.к} \quad (10)$$

где V_m – объём топки, м³;
 $V_{фак}$ – объём топливного факела, м³;
 $V_{вход.к}$ – объём газа во входном пространстве в конвективную часть, м³.

$$V_m = 0,786 \cdot D_{вн.m}^2 \cdot L_m,$$

здесь $L_m = 2,253$ м – протяжённость топки.

Выполним расчёт объёма топливного факела в виде конуса:

$$V_{фак} = 1/3 \cdot 0,786 \cdot L_{фак} \cdot (0,12 + 0,1 \cdot 0,48 + 0,482).$$

В) продуктов сгорания в конвективной части котла, с:

$$\tau_{проб.з.к} = V_{z.к} / (\Sigma S_{z.мп} v_{z.мп.ср}), \quad (11)$$

где $V_{z.к} = V_{z.m.}$

$$\Sigma S_{z.мп} = \pi / 4 d_{вн}^2 \cdot Z, \quad (12)$$

$$v_{z.мп} = B_p W_{z.к} / \Sigma S_{мп.вн}, \quad (13)$$

где $B_p = 0,06$ кг/с – секундный расход мазута;
 $W_{z.к} = 12,05$ м³/кг – удельный объём продуктов сгорания мазута; число трубок;
 $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубок, м.

Тогда в развёрнутом виде коэффициент выравнивания временного баланса будет равен:

$$\kappa_{вырав.} = \frac{V_6}{S_{меж.пр} v_{меж.пр} (V_{z.к} / (\Sigma S_{z.мп} v_{z.мп.ср}) + V_{z.m.} / (S_{вых.z.m} v_{z.m.ср}))}. \quad (14)$$

Тепловой баланс

С учётом $\kappa_{вырав.}$ распишем составляющие внутрикотлового теплового баланса (4) в кДж:

$$Q_6 = \kappa_{вырав.} (Q_{z.m.} + Q_{z.к}). \quad (15)$$

$$Q_6 = (4,18 \cdot C_6) \cdot \Delta t_6 \cdot \rho_6. \quad (16)$$

А) поглощение теплоты водой в топке:

$$Q_{z.m.} = B_p W_{z.m} V_{z.m} \cdot \rho_{z.m.ср} \cdot \Delta I_{z.m} / (S_{вых.z.m} v_{z.m.ср}), \quad (17)$$

где $\Delta I_{z.m} = I_{z.ф} - I_{z.вых.т}$.

Выше снижение энтальпии продуктов сгорания в топке, кДж/кг.

Б) поглощение теплоты водой в конвективной части:

$$Q_{z.к} = B_p W_{z.к} V_{z.к} k_{исп} \cdot \rho_{z.к.ср} \Delta I_{z.к} / ((\Sigma S_{z.мп} v_{z.мп.ср})), \quad (18)$$

где $\rho_{z.к.ср}$ – средняя плотность дымового газа в конвективной части с учётом снижения температуры от 1 054 до 210 °С.

Начальную плотность приравняем к плотности на выходе из топки, т. е. $\rho_{z.m} = \rho_{z.к.н} = 0,265$ кг/м³.

$$\rho_{z.к.ср} = 0,5(\rho_{z.к.н} + \rho_{z.к.к}),$$

где $\rho_{z.к.к} = 273 / (273 + t_{210})$ кг/м³.

Коэффициент использования теплоты $k_{исп} = 1 - (q_{мех.н} + q_{т.лом}) = 1 - (0,003 + 0,035) = 0,962$.

С учётом вышеизложенного, подставляя формулы (16), (17), (18) для расчёта необходимой теплоты для нагрева воды Q_6 и поглощённой теплоты в топке и конвективной части $Q_{z.m.}$ и $Q_{z.к}$, запишем основное уравнение конструктивно – поверочного расчёта элементов конвективного пучка:

$$4,18 C_6 V_6 \rho_6 \Delta t_6 = \kappa_{вырав.} B_p W_{z.к} V_{z.к} k_{исп} [\Delta I_{z.к} \rho_{z.к.ср} / (\Sigma S_{z.мп} v_{z.мп.ср}) + \Delta I_{z.m} \rho_{z.m.ср} / (S_{вых.z.m} v_{z.m.ср})]. \quad (19)$$

Невязка между полезно использованной теплотой (левая часть уравнения) и переданной воде горячим газом рассчитывается по формуле (19):

$$\text{Невязка} = [(\text{правая часть формулы минус левая}) / \text{правая}] \cdot 100 \%$$

Используя предложенную методику, разработана программа «Оптимизация характеристик котлоагрегата» на Visual Basic для расчёта невязки и оптимизированных значений расходов топлива и теплоносителя. Оптимизация была выполнена путем последовательного перебора значений расхода теплоносителя. Так, для котла ВК-34 мощностью 630 кВт при использовании природного газа и теплоносителя – воды с температурным режимом 115/70 °С была достигнута минимальная невязка 0,02 % только при расходе теплоносителя 5,31 кг/с. При этом внутренний диаметр конвективных трубок и их количество остались неизменными (заводскими) и равными 35 мм и 96 шт. Таким образом, оптимизация показала, что поверхность нагрева воды практически не влияют на невязку. Необходимо отметить также, что в зависимости от эксплуатационных требований возможна оптимизация не только по расходу теплоносителя, но и по расходу топлива.

ВЫВОДЫ

1. Самым приемлемым вариантом достижения нормативной невязки является вариант с использованием баланса мощностей.
2. Путём оптимизации на ЭВМ на примере котла ВК-34 за счет увеличения поверхности нагрева воды не удалось снизить невязку до нормативной 0,5 %.
3. Полученный $k_{\text{выр}} \approx 10-12$ оказался близким к оптимальному для котлов типа ВК-34 при использовании низкосернистого мазута и природного газа.
4. Работа будет продолжена с целью использования в курсовых и дипломных работах.
5. В перспективе будет разработана более обширная математическая модель по расчёту на ЭВМ оптимальных конструктивных элементов всего котлоагрегата, которая позволит увеличить КПД таких котлов примерно на 1...3 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лук'янов, О. В. Теплогенераторы для локальных систем теплоснабжения [Текст] / О. В. Лук'янов. – Макіївка : Донбаська держ. акад. буд. і арх., 2003. – 156 с.
2. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод [Текст] / Под ред. Н. В. Кузнецова, В. В. Митора, И. Е. Дубовского, Э. С. Карасиной. – М. : Энергия, 1973. – 296 с.
3. Тепловой расчёт промышленных теплоагрегатов [Текст] / Под ред. В. И. Частухина. – К. : Выща школа, 1980. – 183 с.
4. Скрышников, В. Б. Энергосберегающая технология системы микроклимата промышленного объекта [Текст] / В. Б. Скрышников. – Днепропетровск : РИО ПГАСА, 2004. – 205 с.
5. Децентрализованное производство тепловой энергии и разработка энергоэффективных водонагревателей для его реализации [Текст] / Б. Д. Сезоненко, В. Ю. Никитин, О. Б. Сезоненко [и др.] // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1999. – № 3. – С. 30–36.
6. Апальков, А. П. Термодинамическая оценка влияния коэффициента избытка воздуха и рециркуляции продуктов сгорания на энергетические характеристики топливоиспользующих агрегатов [Текст] / А. П. Апальков // Пром. теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 1. – С. 142–146.

Получено 19.09.2017

В. М. КАЧАН, О. В. ЛУК'ЯНОВ, Є. В. КОНОПАЦЬКИЙ
ВДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНВЕКТИВНОЇ
ЧАСТИНИ ЖАРОТРУБНИХ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛОАГРЕГАТІВ
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Представлено математичний опис гідродинамічних і масообмінних елементарних подій процесу теплообміну на прикладі жаротрубного водогрійного котла ВК-34. Ці події об'єднані в математичну модель через баланс часу перебування води і продуктів згоряння та традиційний тепловий баланс в об'ємі котла, що спрощує процес перерахунку необхідної кількості палива і теплоносія при зміні виду і якості палива.

Ключові слова: попередній розрахунок, математична модель, конвективна частина, продукти згоряння, газ, теплоносій, ККД теплопередачі, оптимізація.

VLADIMIR KACHAN, ALEXANDER LUKYANOV, EVGENIY KONOPATSKIY
IMPROVEMENT OF THE CALCULATION OF CONVECTIVE PART ELEMENTS
OF HEAT TRAINING WATER HEAT UNITS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The mathematical description of hydrodynamic and mass-exchange elementary events in the heat exchange process has been presented on the example of a fire-tube hot water boiler VK-34. These events have been combined into a mathematical model through the balance of residence time of water and combustion products and the traditional heat balance in the boiler volume, which simplifies the process of recalculating the required amount of fuel and coolant when the type and quality of the fuel changes.

Key words: preliminary calculation, mathematical model, convective part, combustion products, gas, heat carrier water, heat transfer efficiency, optimization.

Качан Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: оптимизация технологических процессов.

Лукьянов Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: автономные системы теплоснабжения, источники теплоты.

Конопацкий Евгений Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры специализированных информационных технологий и систем ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: разработка инструментов многомерной геометрии в БН-исчислении для геометрического моделирования объектов, процессов и явлений; геометрическое моделирование и оптимизация многофакторных процессов и явлений живой природы, техники, технологии, экономики, строительства и архитектуры.

Качан Володимир Миколайович – доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: оптимізація технологічних процесів.

Лук'янов Олександр Васильович – доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: автономні системи теплопостачання, джерела теплоти.

Конопацький Євген Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціалізованих інформаційних технологій і систем ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розробка інструментів багатовимірної геометрії у БН-численні для геометричного моделювання об'єктів, процесів і явищ; геометричне моделювання і оптимізація багатofакторних процесів і явищ живої природи, техніки, технології, економіки, будівництва і архітектури.

Kachan Vladimir – Sc. D. (Eng.), Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: optimization of technological processes.

Lukyakov Alexander – Sc. D. (Eng.), Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: independent heat supply systems, heat sources.

Konopatskiy Evgeniy – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Specialized Information Technology and Systems Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development tools multidimensional geometry in BN-calculation for geometric modeling objects, processes and phenomena's; geometric modeling and optimization of multifactor processes and phenomena's of living nature, engineering, technology, economics, civil engineering and architecture.