

Тимченко Богдан Евгеньевич
аспирант 2-го курса
Омский государственный университет путей сообщения
Россия, Омск

ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ В КОТЛАХ КВГМ

Аннотация. Математическая модель теплообмена уходящих газов в котлах типа КВГМ базируется на законах сохранения массы, импульса и энергии для потока продуктов сгорания, при этом центральное место занимает уравнение сохранения энергии — именно оно определяет температурный уровень дымовых газов на выходе из котла и величину тепловых потерь. Модель учитывает два ключевых механизма теплопередачи — конвективный (описываемый законом Ньютона–Рихмана с коэффициентом теплоотдачи, вычисляемым через критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля) и радиационный (рассчитываемый по закону Стефана–Больцмана с учётом эффективной излучательной способности газов). Теплофизические свойства дымовых газов (теплоёмкость, теплопроводность, плотность) рассматриваются как функции температуры и компонентного состава (CO_2 , H_2O , N_2 , O_2), что повышает точность расчётов. Для практической реализации приняты упрощающие допущения (стационарность, одномерность потока, полное горение), а заданные граничные условия (температуры газов и теплоносителя, температура окружающей среды) позволяют рассчитать распределение температуры по газовому тракту, температуру на выходе и тепловые потери, что даёт основу для оптимизации режимов работы котла без изменения его конструкции.

Ключевые слова: водогрейный котел, дымовые газы, математическая модель, теплообмен, тепловые потери

Timchenko Bogdan Evgenievich
Second-year postgraduate student
Omsk State Transport University
Omsk, Russia

BASIC MATHEMATICAL PRINCIPLES OF MODELING THE HEAT EXCHANGE OF EXHAUST GASES IN KVGM BOILERS

Abstract. The mathematical model of heat exchange of exhaust gases in KVGM-type boilers is based on the laws of conservation of mass, momentum, and energy for the flow of combustion products moving through the boiler gas ducts

and transferring heat to the heating surfaces. The energy conservation equation takes center stage — it determines the temperature level of flue gases at the boiler outlet and the amount of heat losses. The model accounts for two key heat transfer mechanisms: convective (described by Newton–Rikhman’s law, with the heat transfer coefficient calculated via the Nusselt, Reynolds, and Prandtl criteria) and radiative (calculated using the Stefan–Boltzmann law, taking into account the effective emissivity of the gases). Thermophysical properties of flue gases (specific heat capacity, thermal conductivity, density) are treated as functions of temperature and component composition (CO_2 , H_2O , N_2 , O_2), which improves calculation accuracy. For practical implementation, simplifying assumptions are adopted (steady-state operation, one-dimensional flow, complete combustion), and given boundary conditions (temperatures of gases and heat-transfer fluid, ambient temperature) allow calculating the temperature distribution along the gas duct, the outlet temperature, and heat losses — providing a basis for optimizing boiler operation modes without altering its design.

Keywords: *hot-water boiler, flue gases, mathematical model, heat exchange, heat losses.*

Водогрейные котлы типа КВГМ широко применяются в системах централизованного теплоснабжения для производства тепловой энергии на природном газе и отличаются высокой надёжностью, простотой конструкции и возможностью работы в широком диапазоне тепловых нагрузок. Вместе с тем значительная часть тепловых потерь в котлах данного типа связана с уносом физической теплоты уходящими дымовыми газами, температура которых на выходе из котла во многих эксплуатационных режимах остаётся существенно выше температуры окружающей среды. Снижение этих потерь является одним из наиболее эффективных и экономически оправданных путей повышения общего коэффициента полезного действия котельных установок без внесения радикальных конструктивных изменений.

Современные требования к энергетической эффективности и экологическим показателям теплогенерирующих установок обуславливают необходимость оптимизации режимов работы котлов КВГМ, направленной на уменьшение температуры уходящих газов при сохранении устойчивости процесса горения, допустимых аэродинамических характеристик газоходов и коррозионной надёжности поверхностей нагрева. Решение данной задачи невозможно без построения адекватной математической модели теплообмена уходящих газов, позволяющей установить количественные зависимости между эксплуатационными параметрами котла — тепловой нагрузкой, коэффициентом избытка воздуха, температурным режимом теплоносителя — и величиной тепловых потерь с дымовыми газами.

Математическое моделирование теплообмена в газоходах котлов КВГМ основывается на законах сохранения энергии и использовании критериальных зависимостей конвективного и радиационного теплообмена с учётом температурной зависимости теплофизических свойств продуктов сгорания. Такой подход позволяет не только описывать распределение температур дымовых газов по тракту котла, но и проводить анализ влияния различных эксплуатационных режимов на эффективность теплопередачи, выявлять резервы снижения потерь с уходящими газами и обосновывать мероприятия по совершенствованию режимов эксплуатации без изменения конструктивной схемы котла.

В связи с этим целью настоящей работы является разработка и анализ математической модели теплообмена уходящих газов в котлах типа КВГМ, ориентированной на оценку влияния эксплуатационных режимов на температуру дымовых газов и тепловые потери, а также на обоснование путей повышения энергетической эффективности котельных установок за счёт рационального управления процессами теплообмена.

Постановка задачи и допущения математической модели

Целью математического моделирования теплообмена уходящих газов в котлах типа КВГМ является определение температурного уровня продуктов сгорания на выходе из котла и количественная оценка тепловых потерь с дымовыми газами в зависимости от эксплуатационных режимов. Для достижения поставленной цели необходимо построить модель, позволяющую установить функциональные зависимости между параметрами горения и теплообмена, с одной стороны, и температурой уходящих газов и тепловой эффективностью котла — с другой.

В качестве объекта моделирования рассматривается поток продуктов сгорания, образующийся при сжигании природного газа в топочной камере котла КВГМ и движущийся по газовому тракту котла через радиационные и конвективные поверхности нагрева до выхода в дымовую трубу. Основной задачей модели является описание процесса охлаждения дымовых газов в результате теплообмена с поверхностями нагрева при заданных условиях горения и теплоотвода к теплоносителю.

Для формализации задачи принимается стационарный режим работы котла, что соответствует наиболее характерным условиям его эксплуатации в отопительный период. Изменения параметров во времени не рассматриваются, а все величины считаются усреднёнными по сечению газоходов. Поток дымовых газов моделируется как одномерный, что позволяет описывать изменение температуры газов вдоль газохода котла в функции продольной координаты.

В рамках модели предполагается, что химический состав продуктов сгорания определяется условиями горения топлива и остаётся неизменным по длине газопроводов. Горение топлива считается полным, а образование побочных продуктов реакции не учитывается. Коэффициент избытка воздуха принимается постоянным для рассматриваемого режима и задаёт массовый расход дымовых газов и их теплофизические свойства.

Основным уравнением модели является уравнение энергетического баланса потока дымовых газов, учитывающее теплообмен с поверхностями нагрева котла. Для элементарного участка газопровода это уравнение записывается в дифференциальной форме, связывающей изменение температуры газов с интенсивностью теплоотдачи. Теплообмен между газами и стенками поверхностей нагрева описывается с учётом конвективной и радиационной составляющих теплового потока, причём вклад каждой из них определяется температурным уровнем газов и геометрическими характеристиками котла.

При расчёте теплофизических свойств дымовых газов учитывается их зависимость от температуры и состава. Теплоёмкость газовой смеси определяется как сумма теплоёмкостей отдельных компонентов, взвешенных по их мольным долям. Для обеспечения возможности аналитического интегрирования уравнений энергетического баланса температурные зависимости теплоёмкостей аппроксимируются полиномиальными выражениями, коэффициенты которых выбираются на основе справочных термодинамических данных.

В качестве граничных условий задачи задаются температура дымовых газов на выходе из топочной камеры, определяемая тепловой нагрузкой котла и условиями горения, а также температура теплоносителя на входе и выходе из котла. Температура окружающей среды принимается постоянной и используется при расчёте тепловых потерь с уходящими газами.

Таким образом, постановка задачи сводится к решению системы уравнений энергетического баланса дымовых газов с учётом температурно-зависимых теплофизических свойств и режимных параметров котла КВГМ. Решение данной задачи позволяет определить температурное поле уходящих газов, оценить величину тепловых потерь и провести анализ влияния эксплуатационных режимов на энергетическую эффективность котла, что является необходимым этапом при разработке рекомендаций по оптимизации его работы.

3. Математическое описание теплообмена уходящих газов

Теплообмен уходящих газов в котлах типа КВГМ описывается на основе уравнения энергетического баланса потока продуктов сгорания,

движущегося по газовому тракту котла и передающего теплоту поверхностям нагрева. Рассматривается стационарный режим работы, при котором параметры процесса не зависят от времени, а все величины усреднены по поперечному сечению газоходов.

Для элементарного участка газохода энергетический баланс дымовых газов может быть записан в дифференциальной форме:

$$\dot{m}_g c_{p,g}(T) \frac{dT}{dx} = -q(x), \quad (1)$$

где \dot{m}_g — массовый расход дымовых газов,

$c_{p,g}(T)$ — удельная теплоёмкость, T — температура газов, x — продольная координата газохода, $q(x)$ — удельный тепловой поток от газов к поверхностям нагрева.

Тепловой поток от дымовых газов к поверхностям нагрева складывается из конвективной и радиационной составляющих:

$$q = q_k + q_p. \quad (2)$$

Конвективный теплообмен описывается законом Ньютона:

$$q_k = \alpha_2 A (T - T_{cm}), \quad (3)$$

где α_2 — коэффициент теплоотдачи от газов, A — площадь теплообменной поверхности, T_{cm} — температура стенки.

Коэффициент теплоотдачи определяется с использованием критериальных зависимостей вида:

$$Nu = C Re^n Pr^m, \quad (4)$$

где Nu , Re и Pr — числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля соответственно, а коэффициенты C , n и m выбираются в соответствии с режимом течения дымовых газов и геометрией газоходов котла КВГМ.

Радиационный теплообмен, существенный в зоне высоких температур, описывается выражением:

$$q_m = \varepsilon_r \sigma A (T^4 - T_{cm}^4), \quad (5)$$

где ε_r — эффективная излучательная способность продуктов сгорания, σ — постоянная Стефана–Больцмана.

Теплофизические свойства дымовых газов зависят от температуры и их компонентного состава. Удельная теплоёмкость газовой смеси определяется как:

$$c_{p,g}(T) = \sum_i y_i c_{p,i}(T), \quad (6)$$

где y_i — мольная доля i -го компонента (CO_2 , H_2O , N_2 , O_2), $c_{p,i}(T)$ — его теплоёмкость. Для аналитического решения уравнения энергетического баланса температурные зависимости теплоёмкостей аппроксимируются полиномиальными функциями температуры, что позволяет выполнить интегрирование по температуре в явном виде.

Интегрирование уравнения энергетического баланса по длине газового тракта котла с учётом заданных граничных условий позволяет определить распределение температуры дымовых газов и их температуру на выходе из котла. Полученное решение используется для расчёта тепловых потерь с уходящими газами и анализа влияния эксплуатационных режимов котлов КВГМ, таких как тепловая нагрузка и коэффициент избытка воздуха, на энергетическую эффективность котельной установки.

1. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 416 с. — ISBN 5-283-00465-X.
2. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Высшая школа, 1980. — 469 с.
3. Кудинов, А. А. Теплоэнергетические установки / А. А. Кудинов. — М.: Инфра-М, 2020. — 376 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). — ISBN 978-5-16-015642-3.
4. Щёкин, В. И. Котельные установки и парогенераторы / В. И. Щёкин. — СПб.: Лань, 2021. — 288 с. — ISBN 978-5-8114-3045-7.
5. Богданов, С. Н. Теплогенерирующие установки: учебник для вузов / С. Н. Богданов, В. Н. Плотников, Ю. И. Толстова. — М.: Академия, 2019. — 320 с. — ISBN 978-5-4468-8765-1.
6. Методические указания по расчёту потерь теплоты и КПД котельных агрегатов с учётом местных условий эксплуатации / Минэнерго СССР. — М., 1985. — 64 с.