

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-47-53

Губарев А.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: artwo0248@mail.ru*

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ КОТЕЛЬНОЙ С ВОДОГРЕЙНЫМИ КОТЛАМИ

Аннотация. Объектом исследования являются тепловые источники систем теплоснабжения – одних из наиболее важных систем жизнеобеспечения. Рассмотрены виды систем теплоснабжения в зависимости от степени централизации и источника теплоснабжения. Указаны их достоинства и недостатки. Целесообразность использования той или иной системы теплоснабжения, определяется целым рядом условий. При этом каждая из систем теплоснабжения актуальна. Отмечено, что с точки зрения использования в качестве топлива некоторых видов возобновляемых источников энергии наиболее предпочтительными системами являются децентрализованные и централизованные с тепловым источником в котельной.

При проектировании новых и реконструировании действующих котельных важным элементом проекта является составление и расчет тепловой схемы. В ходе расчета тепловой схемы котельной при определении расходов и параметров теплоносителей, используемых в процессе подготовки воды для восполнения потерь в системе теплоснабжения, приходится использовать метод последовательных приближений. Это усложняет расчет и требует большего ресурса времени на его реализацию.

Представлена формула, позволяющая избежать использования метода последовательных приближений в ходе выполнения расчета тепловой схемы котельной. Указаны особенности алгоритма расчета тепловой схемы при использовании предложенной формулы.

Ключевые слова: тепловой источник, тепловая схема, расчет, восполнение потерь воды, расход химически очищенной воды.

Введение. Системы теплоснабжения являются одними из наиболее важных систем жизнеобеспечения человека. Даже несмотря на то, что в последние десятилетия наблюдаются существенные изменения климата планеты, а именно – повышение глобальной температуры [1] – функционирование этих систем продолжает оставаться важнейшим фактором, обуславливающим комфортное и безопасное существование человека.

В Российской Федерации доминируют системы централизованного теплоснабжения, однако наблюдаются тенденции к повышению доли децентрализованных систем [2]. При этом среди централизованных систем теплоснабжения наиболее эффективными и предпочтительными к использованию являются системы, тепловым источником в которых являются теплоэлектроцентрали [3, 4]. На указанных объектах вырабатываемая и направляемая потребителям тепловая энергия является дополнительной продукцией, позволяющей повысить эффективность станции. При этом удельные затраты на оборудование систем топливоподготовки, водоподготовки, газоочистки и т.п. на электростанции существенно ниже по сравнению с аналогичными затратами в централизованных и автономных системах теплоснабжения с тепловым источником в котельной. Однако, такой источник теплоснабжения занимает значительную площадь, требует наличия

вблизи источника водоснабжения со значительным запасом воды. Снабжение потребителей тепловой энергией от такого источника связано с использованием протяженных тепловых сетей. Тепловые сети большой протяженности характеризуются высокими тепловыми и гидравлическими потерями, повышенными затратами на обслуживание и ремонт оборудования. Кроме того, такие системы характеризуются более сложным регулированием отпуска теплоты в тепловом источнике [5].

Перечисленные недостатки централизованных систем теплоснабжения нивелируются при использовании автономных или децентрализованных систем. При этом, представляется справедливым указать на то, что такие системы также обладают рядом недостатков [6], к основным из которых можно отнести: значительное увеличение установленной мощности основного оборудования таких систем по сравнению с суммарной мощностью для теплоснабжения одного и того же потребителя, но при подключении его к центральным тепловым сетям, а также рост удельной производительности и массы вспомогательного оборудования, предназначенного, например, для химической подготовки воды, подготовки топлива к сжиганию, снижения вредных выбросов с уходящими газами. Это повышает стоимость выработки единицы тепловой энергии. Кроме того, использование автономных систем теплоснабже-

ния и установка теплового источника непосредственно рядом с объектом потребления тепловой энергии – жилым сектором – обусловит выбросы уходящих газов в непосредственной близости от жилых зданий. В условиях плотной застройки возможности по качественному рассеиванию вредных выбросов с уходящими от котельной или автономных теплогенераторов газами могут быть ограничены. Этот фактор может негативно сказаться на комфорте потребителей тепловой энергии и их здоровье. Необходимо, однако, отметить, что имеются работы, в которых приводятся данные, указывающие на то, что удельный выход некоторых загрязняющих атмосферу веществ с уходящими газами теплогенерирующих установок малой мощности ниже аналогичных показателей агрегатов большой и средней теплопроизводительности [7].

Решение в некоторой степени проблем, возникающих при использовании децентрализованных систем теплоснабжения, но при сохранении некоторых их достоинств возможно в централизованных системах теплоснабжения, тепловым источником в которых является районная или квартальная котельная. Такие объекты являются достаточно крупными, что позволяет снизить удельные затраты на производство тепловой энергии. При этом, котельные располагаются на некотором расстоянии от жилых и общественных зданий и сооружений, что позволяет улучшить экологическую обстановку у теплопотребителей. В то же время расстояния от теплового источника до абонентских вводов, а, следовательно, протяженность тепловых сетей и потери в них теплоты и теплоносителя для таких систем существенно ниже, по сравнению с системами, тепловым источником в которых является теплоэлектроцентр.

Таким образом, можно утверждать, что в настоящее время актуальным является использование любого из рассмотренных вариантов систем теплоснабжения потребителей. Выбор конкретного варианта определяется комплексом факторов, таких как географическое положение системы теплоснабжения и теплопотребителей, возможность для вновь строящихся объектов теплопотребления подключения к уже имеющейся системе теплоснабжения, плотность застройки, обеспеченность региона топливно-энергетическими ресурсами, их вид, наличие источника водоснабжения, запас воды в нем, соотношение затрат на строительство и эксплуатацию сравниваемых вариантов систем теплоснабжения и т.п.

В связи с постепенным исчерпанием невозобновляемых углеводородных топливно-энерге-

тических ресурсов на планете, еще одним фактором, влияющим на выбор вида системы теплоснабжения, является возможность и условия использования в качестве источников энергии альтернативных возобновляемых ресурсов. К таким ресурсам могут быть отнесены, например, биогаз [8] или твердые бытовые отходы – биомасса [9]. В связи с тем, что перечисленные виды топлива, как правило, используются в непосредственной близости от мест их генерации или переработки [10], сжигание их наиболее целесообразно в котельных малой или средней производительности [11]. Из указанных соображений наиболее предпочтительными являются либо децентрализованные местные системы, либо централизованные системы с тепловым источником в котельной.

При проектировании новых и реконструируемых котельных, число и производительность устанавливаемых в них котельных установок выбираются из условий обеспечения расчетной мощности котельных на всех расчетных режимах в период покрытия сезонной нагрузки, а также стабильной работы котлов при минимально допустимой нагрузке в теплый период года. С целью определения нагрузки котельной на расчетных режимах, а также выбора типа и количества устанавливаемых в котельной котлов производится составление и расчет тепловой схемы котельной.

Материалы и методы. Важной частью расчета тепловой схемы котельной с водогрейными котлами является определение расхода воды для восполнения потерь теплоносителя в тепловом источнике, системе теплоснабжения и у теплопотребителя, а также расходов греющей воды для подогревателей подпиточной воды и греющей воды, направляемой в деаэратор. Кроме того, необходимо определить параметры греющего и нагреваемого теплоносителей на входе в каждый теплообменный или тепломасообменный аппарат и на выходе из них. Полученные данные в дальнейшем служат для проведения конструктивного теплового расчета указанных аппаратов и подбора их по каталогам.

Типовая схема аппаратов для подготовки подпиточной воды в котельной с водогрейными котлами представлена на рис. 1.

Сырая вода, предназначенная для восполнения потерь теплоносителя в тепловых сетях, с расходом $G_{с.в}$ и температурой $t_{с.в}$ поступает в подогреватель 5, в котором подогревается до температуры $t'_{х.о.в}$, а затем подается в аппараты химической очистки. Химически очищенная вода с расходом $G_{х.о.в}$ сначала подогревается до температуры $t''_{х.о.в}$ в охладителе деаэрированной воды 7, а за-

тем до температуры $t_{\text{х.о.в}}^{\text{д}}$ в подогревателе 6, после чего направляется в деаэратор 8, в который также с расходом $G_{\text{гр}}^{\text{д}}$ поступает греющий теплоноситель – вода, нагретая в водогрейных котлах до температуры $t_1^{\text{вк}}$. Деаэрированная вода с параметрами $G_{\text{ут}}$ и $t'_{\text{подп}}$ проходит через охладитель 7, в котором часть ее тепловой энергии используется для подогрева химически очищенной воды, за счет чего температура деаэрированной воды снижается до значения температуры обратной сетевой воды $t''_{\text{подп}} = t_2$. Подогрев химически очищенной и сырой воды в теплообменных аппаратах, соответственно, 6 и 5 осуществляется проходящей их последовательно с расходом $G_{\text{гр}}^{\text{под}}$ водой, нагретой в водогрейных котлах. В аппарат 6

греющий теплоноситель поступает с температурой $t_1^{\text{вк}}$ и охлаждается в нем до температуры $t''_{\text{гр}}$, а в аппарате 5 он охлаждается до температуры $t''_{\text{подп}}$, с которой направляется в обратную линию тепловой сети.

Таким образом, схема включает теплообменные аппараты: подогреватель сырой воды, охладитель деаэрированной воды, подогреватель химически очищенной воды перед деаэратором и теплоемкообменный аппарат – деаэратор. С целью определения параметров теплоносителей для каждого из перечисленных теплообменных аппаратов составляется уравнение теплового баланса, а для теплоемкообменного аппарата – теплового и материального балансов [12].

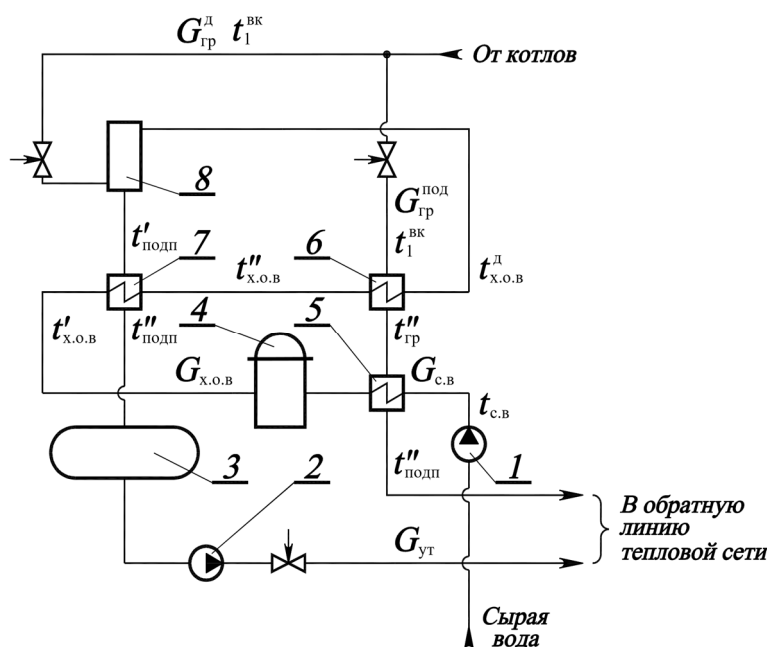


Рис. 1. Схема подготовки воды для подпитки тепловых сетей в котельной с водогрейными котлами
1 – насос сырой воды; 2 – подпиточный насос; 3 – бак деаэрированной воды; 4 – аппараты химводоочистки; 5 – подогреватель сырой воды; 6 – подогреватель химически очищенной воды; 7 – охладитель деаэрированной воды; 8 – деаэратор

Уравнения теплового баланса после некоторых преобразований (при допущении, что в рабочем диапазоне температур истинная изобарная теплоемкость воды c_v считается величиной постоянной) могут быть записаны следующим образом:

– для подогревателя сырой воды

$$G_{\text{с.в.}}(t'_{\text{х.о.в.}} - t_{\text{с.в.}}) = G_{\text{гр}}^{\text{под}}(t''_{\text{гр}} - t''_{\text{подп}})\eta, \quad (1)$$

– для охладителя деаэрированной воды

$$G_{\text{х.о.в.}}(t''_{\text{х.о.в.}} - t'_{\text{х.о.в.}}) = G_{\text{ут}}(t'_{\text{подп}} - t''_{\text{подп}})\eta, \quad (2)$$

– для подогревателя химически очищенной воды перед деаэратором

$$G_{\text{х.о.в.}}(t_{\text{х.о.в.}}^{\text{д}} - t_{\text{х.о.в.}}^{\text{вк}}) = G_{\text{гр}}^{\text{под}}(t_1^{\text{вк}} - t''_{\text{гр}})\eta, \quad (3)$$

– для деаэлятора

$$G_{\text{х.о.в.}}t_{\text{х.о.в.}}^{\text{д}} + G_{\text{гр}}^{\text{д}}t_1^{\text{вк}} = G_{\text{ут}}t'_{\text{подп}}. \quad (4)$$

Уравнение материального баланса деаэлятора имеет вид

$$G_{\text{х.о.в.}} + G_{\text{гр}}^{\text{д}} = G_{\text{ут}}. \quad (5)$$

В представленных уравнениях известными величинами являются: расходы сырой воды $G_{\text{с.в.}}$ и подпиточной воды для восполнения утечек в тепловых сетях и в системе потребителей $G_{\text{ут}}$, температуры сырой воды $t_{\text{с.в.}}$, воды на выходе из водо-

грейного котла $t_1^{\text{БК}}$, греющей воды после подогревателя химически очищенной воды $t_{\text{гр}}''$, подпиточной воды после деаэратора $t_{\text{подп}}'$ и после охладителя деаэрированной воды $t_{\text{подп}}''$, а также коэффициент, учитывающий тепловые потери в теплообменных аппаратах η .

Параметры: расход химически очищенной воды $G_{\text{х.о.в.}}$, расходы греющей воды на подогреватель химически очищенной воды $G_{\text{гр}}^{\text{под}}$ и на деаэратор $G_{\text{гр}}^{\text{д}}$, температура сырой воды перед химводоочисткой $t_{\text{х.о.в.}}'$, температура химически очищенной воды после охладителя деаэрированной воды $t_{\text{х.о.в.}}''$ и на входе в деаэратор $t_{\text{х.о.в.}}^{\text{д}}$ на момент осуществления расчета считаются определяемыми.

Основная часть. Таким образом, имеется незамкнутая система из пяти уравнений с шестью неизвестными. Для решения указанной системы уравнений обычно используют метод последовательных приближений. Предварительно приняв расход химически очищенной воды и ее температуру перед аппаратами химводоочистки, находят по уравнению (2) температуру химически очищенной воды на выходе из охладителя деаэрированной воды. Затем, предварительно задавшись расходом греющей воды на подогреватель химически очищенной воды, воспользовавшись уравнением (3), определяют значение температуры, с которой вода поступает в деаэратор, а далее из уравнения (1) уточняют температуру химически очищенной воды перед аппаратами химводоочистки. Из уравнения (4) теплового баланса для деаэратора находят расход греющей воды на деаэратор, а затем по уравнению (5) материального баланса деаэратора уточняют расход химически очищенной воды на подпитку тепловой сети. В том случае, если расхождение между предварительно принятыми и уточненными в результате расчета величинами существенно, приходится принимать другие значения расходов химически очищенной воды и греющей воды на подогрева-

тель химически очищенной воды, а также температуры сырой воды перед аппаратами химводоочистки и повторять расчет.

Очевидно, что метод последовательных приближений весьма громоздок, требует проведения нескольких итераций, т.е., зачастую, значительных затрат времени или применения программных ресурсов. Использование указанного метода целесообразно в том случае, когда выражение принимаемых величин в явном виде и их однозначное определение невозможно или более трудоемко.

Известно, что подогрев сырой воды перед аппаратами химводоочистки осуществляется с целью улучшения процесса водоподготовки и предотвращения запотевания оборудования. При этом, подогреватели сырой воды выбираются из расчета ее нагрева до температуры не ниже 15 °С, но не выше температуры, допускаемой по техническим характеристикам используемых ионообменных материалов и конструктивов фильтров [13]. Обычно верхний предел подогрева воды для отопительных и отопительно-производственных котельных находится в диапазоне от 20...22 °С [14] до 30 °С [15]. С учетом того, что диапазон температур сырой воды перед аппаратами химводоочистки довольно узок, а также, принимая во внимание, что при проектировании теплового источника производится выбор фильтров и ионообменных материалов, температура сырой воды перед химводоочисткой, с учетом уже произведенного выбора аппаратов и материалов для водоподготовки, может быть задана.

Тогда система уравнений содержит пять неизвестных и является замкнутой. Для решения данной системы первоначально из уравнения (1) в явном виде может быть выражен расход греющей воды на подогреватель химически очищенной воды, поскольку при заданном значении температуры сырой воды перед аппаратами химводоочистки все остальные члены этого уравнения известны. Решая далее систему уравнений (1)–(5), используя, в основном, метод подстановки, и проведя ряд преобразований, можно получить уравнение для определения расхода химически очищенной воды

$$G_{\text{х.о.в.}} = \frac{G_{\text{ут}}(t_1^{\text{БК}} - t_{\text{подп}}') + G_{\text{с.в.}} \frac{(t_{\text{х.о.в.}}' - t_{\text{с.в.}})(t_1^{\text{БК}} - t_{\text{гр}}'')}{t_{\text{гр}}'' - t_{\text{подп}}''} + G_{\text{ут}}(t_{\text{подп}}' - t_{\text{подп}}'')\eta}{t_1^{\text{БК}} - t_{\text{х.о.в.}}'} \quad (6)$$

Приведенное выражение представляется весьма громоздким. Однако, ему можно придать более лаконичную форму. Так, если рассмотреть совместно уравнения (1) и (3), становится оче-

видным, что количество теплоты, полученное химически очищенной водой в подогревателе перед деаэратором, может быть выражено следующим образом

$$Q_{\text{х.о.в}} = G_{\text{гр}}^{\text{под}} c_{\text{в}} (t_1^{\text{БК}} - t_{\text{гр}}^{\text{н}}) \eta = G_{\text{с.в}} c_{\text{в}} \frac{(t'_{\text{х.о.в}} - t_{\text{с.в}})(t_1^{\text{БК}} - t_{\text{гр}}^{\text{н}})}{t_{\text{гр}}^{\text{н}} - t_{\text{подп}}^{\text{н}}}. \quad (7)$$

Уравнение (2) представляет собой тепловой баланс охладителя деаэрированной воды. Таким

образом, количество теплоты, полученное химически очищенной водой в указанном аппарате, равно

$$Q_{\text{охл}} = G_{\text{х.о.в}} c_{\text{в}} (t_{\text{х.о.в}}^{\text{н}} - t_{\text{х.о.в}}^{\text{в}}) = G_{\text{ут}} c_{\text{в}} (t_{\text{подп}}^{\text{н}} - t_{\text{подп}}^{\text{в}}) \eta. \quad (8)$$

Тогда, если числитель и знаменатель уравнения (6) умножить на значение истинной удельной изобарной теплоемкости воды, оно может быть преобразовано к виду

$$G_{\text{х.о.в}} = \frac{G_{\text{ут}} c_{\text{в}} (t_1^{\text{БК}} - t_{\text{подп}}^{\text{н}}) + Q_{\text{х.о.в}} + Q_{\text{охл}}}{c_{\text{в}} (t_1^{\text{БК}} - t_{\text{х.о.в}}^{\text{н}})}. \quad (9)$$

Таким образом, задавшись значением температуры сырой воды, а также выразив в явном виде и определив однозначно расходы химически очищенной воды и греющей воды на подогреватель химически очищенной воды, можно в дальнейшем из уравнения (5) определить расход греющей воды на деаэратор, из уравнения (2) – выразить и рассчитать температуру химически очищенной воды после охладителя деаэрированной воды, а из уравнения (4) – температуру химически очищенной воды перед деаэратором. При этом получается избежать использования громоздкого, трудоемкого и требующего значительных затрат времени метода последовательных приближений для расчета указанных параметров.

Выводы.

1. Системы теплоснабжения потребителей жилищно-коммунального хозяйства с тепловым источником в котельной малой или средней мощности с водогрейными котлами актуальны в настоящее время.

2. Использование метода последовательных приближений при расчете тепловой схемы котельной с водогрейными котлами усложняет расчет и увеличивает затраты времени на его осуществление.

3. Предложенные в статье формулы позволяют, задавшись значением температуры сырой воды, поступающей в аппараты химводоочистки, однозначно определить расход химически очищенной воды для подпитки тепловых сетей потребителей.

4. Получив однозначное значение расхода химически очищенной воды, направляемой в дальнейшем на подпитку системы теплоснабжения, можно определить параметры подпиточной воды на различных стадиях ее подготовки без использования метода последовательных прибли-

жений, что значительно упростит расчет тепловой схемы котельной и существенно сократит время на его осуществление.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шеремет Е.О., Старченко С.Ф. Исследования изменения основных расчетных параметров отопительного периода по архиву температур // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №. 6. С. 19–31. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-6-19-31.
2. Gubarev A.V., Golovkov M.A., Dyachuk D.S., Bychikhin S.A. Methods and devices of heat wasted gases utilization from stationary engines of internal combustion // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1066. 012018. DOI:10.1088/1742-6596/1066/1/012018.
3. Beloborodov S.S., Dudolin A.A. Myths about lack of combined electricity and heat production by combined heat and power plant steam turbine units in comparison with the best available technology of their separate production // Thermal Engineering. 2022. Vol. 69. № 7. Pp. 513–522. DOI:10.1134/s0040601522070023.
4. Смолкин Ю.В., Кругликов П.А., Кулаков Е.Н., Соболев Д.А. Степанов Д.В., Попов А.В. Тепловая и экономическая эффективность ТЭЦ // Электрические станции. 2024. № 8. С. 2–7. DOI:10.71841/ep.elst.2024.1117.8.01.
5. Kozhevnikov V.P., Kuznetsov V.A., Mochalin A.A., Titarenko R.Y. Sokolova L.V. Independent heating modules with condensing hot water boilers as heat generators as an effective alternative to centralized heat supply // Advances in environmental biology. 2014. Vol. 8. № 13. Pp. 89–93.
6. Харламова Н.А. Коммунальная энергетика АПК: состояние, проблемы и перспективы // Аграрный научный журнал. 2019. № 11. С. 99–101. DOI: 10.28983/asj.y2019i11pp99-101.
7. Нурмеев Б.К. Сравнительная оценка загрязнения атмосферы при сжигании органического топлива в тепловых источниках // Промышленная энергетика. 2004. № 7. С. 51–54.
8. Леонов Е.С., Трубаев П.А. Исследование влияния состава биогаза на характеристики его сжигания в котлах // Промышленная энергетика. 2024. № 1. С. 36–45. DOI:10.34831/EP.2024.63.86.005.

9. Ahmed A.A., Trubaev P.A. Use of granulated wood waste and municipal solid waste as fuel: review // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 103. 00038. DOI:10.1051/bioconf/202410300038.

10. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. Technologies for biogas to electricity conversion // Energy Reports. 2022 Vol. 8. Pp. 774–786. DOI:10.1016/j.egy.2022.11.007.

11. Леонов Е.С., Трубаев П.А. Влияние теплофизических свойств продуктов сгорания биогаза на тепловые параметры водогрейных котлов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №. 10. С. 63–71. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71.

12. Бузников Е.Ф., Роддатис К.Ф., Берзиньш Э.Я. Производственные и отопительные котельные. 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1984. 248 с.

13. Методические указания по проектированию инженерных систем подготовки воды. М.: 2020. 57 с.

14. Присяжнюк В.А. Водоподготовка и очистка воды: принципы, технологические приемы, опыт эксплуатации // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2004. № 4 (28). С. 34–49.

15. Магадеев В.Ш. Источники и системы теплоснабжения. М.: ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. 272 с.

Информация об авторах

Губарев Артем Викторович, старший преподаватель кафедры энергетики теплотехнологии. E-mail: artwo0248@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 20.02.2025 г.

© Губарев А.В., 2025

**Gubarev A.V.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: artwo0248@mail.ru*

OPTIMIZATION OF THE CALCULATION OF THE THERMAL SCHEME OF A BOILER HOUSE WITH HOT WATER BOILERS

Abstract. The object of the study is the thermal sources of heat supply systems – one of the most important life support systems. The types of heat supply systems are considered depending on the degree of centralization and the source of heat supply. Their advantages and disadvantages are indicated. The expediency of using a particular heat supply system is determined by a number of conditions. At the same time, each of the heat supply systems is relevant. It is noted that from the point of view of using some types of renewable energy sources as fuel, the most preferred systems are decentralized and centralized with a heat source in the boiler house.

When designing new and reconstructing existing boiler houses, an important element of the project is the preparation and calculation of the thermal scheme. During the calculation of the boiler house thermal scheme, when determining the flow rates and parameters of the heat carriers used in the process of preparing water to compensate for losses in the heat supply system, it is necessary to use the method of successive approximations. This complicates the calculation and requires more time for its implementation.

A formula is presented to avoid using the method of successive approximations during the calculation of the boiler house thermal scheme. The features of the algorithm for calculating the thermal scheme using the proposed formula are indicated.

Keywords: heat source, thermal scheme, calculation, replenishing water losses, flow rate of chemically purified water.

REFERENCES

1. Sheremet E.O., Starchenko S.F. Investigation of changes in the main design parameters of the heating period according to the temperature archive [Isledovanie izmeneniya osnovnyh raschyotnyh parametrov otopitel'nogo perioda po arhivu temperatur]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 6. Pp. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-19-31. (rus)

2. Gubarev A.V., Golovkov M.A., Dyachuk D.S., Bychikhin S.A. Methods and devices of heat wasted gases utilization from stationary engines of internal combustion. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1066. 012018. DOI:10.1088/1742-6596/1066/1/012018.

3. Beloborodov S.S., Dudolin A.A. Myths about lack of combined electricity and heat production by combined heat and power plant steam turbine units

in comparison with the best available technology of their separate production. Thermal Engineering. 2022. Vol. 69. No. 7. Pp. 513–522. DOI: 10.1134/s0040601522070023.

4. Smolkin I.V., Kruglikov P.A., Kulakov E.N., Sobolev D.A., Stepanov D.V., Popov A.V. Thermal and economic efficiency of CHP plants [Teplovaya i ekonomicheskaya effektivnost' TEC]. Electrical stations. 2024. No. 8. Pp. 2–7. DOI: 10.71841/ep.elst.2024.1117.8.01. (rus)

5. Kozhevnikov V.P., Kuznetsov V.A., Mochalin A.A., Titarenko R.Y., Sokolova L.V. Independent heating modules with condensing hot water boilers as heat generators as an effective alternative to centralized heat supply. Advances in environmental biology. 2014. Vol. 8. No. 13. Pp. 89–93.

6. Kharlamova N.A. Communal energy in agricultural sphere: state, problems and prospects [Kommunal'naya energetika APK: sostoyaniye, problem, perspektivy]. The agrarian scientific journal. 2019. No. 11. Pp. 99–101. DOI:10.28983/asj.y2019i11pp99-101. (rus)

7. Nurmeev B.K. Comparative assessment of air pollution in case of fossil fuel burning in thermal sources [Sravnitel'naya ocenka zagryazneniya atmosfery pri sjiganii organicheskogo topliva v teplovyh istochnikah]. Promyshlennaya Energetica, 2004. No. 7. Pp. 51–54. (rus)

8. Leonov E.S., Trubaev P.A. Study of the impact of the biogas composition on the characteristics of its combustion in boilers [Issledovanie vliyaniya sostava biogaza na harakteristiki ego sjiganiya v kotlah]. Promyshlennaya Energetica. 2024. No. 1. Pp. 36–45. DOI:10.34831/EP.2024.63.86.005. (rus)

9. Ahmed A.A., Trubaev P.A. Use of granulated wood waste and municipal solid waste as fuel: review. BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 103. 00038. DOI:10.1051/bioconf/202410300038.

10. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. Technologies for biogas to electricity conversion. Energy Reports. 2022. Vol. 8. Pp. 774–786. DOI: 10/1016/j.egyr.2022.11.007.

11. Leonov E.S., Trubaev P.A. Influence of thermal physical properties of biogas combustion products on the thermal parameters of water heating boilers [Vliyanie teplofizicheskikh svoystv produktov sgoraniya biogaza na teploviye parametry vodogreynyh kotlov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 63–71. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71. (rus)

12. Buznikov E.F., Roddatis K.F., Berzinsh E.Ya. Production and heating boilers [Proizvodstvennye i otopitel'nye kotel'nye]. M.: Energoatomizdat, 1984. 248 p. (rus)

13. Guidelines for the design of engineering water treatment systems [Metodicheskiye ukazaniya po proektirovaniyu inzhenernykh sistem podgotovki vody]. M.: 2020. 57 p. (rus)

14. Prisyajnuik V.A. Water treatment and water purification: principles, technological techniques, operational experience [Vodopodgotovka i ochistka vody: principy, tehnologicheskie priyomy, opyt ekspluatacii]. Plumbing, Heating, Air Conditioning. 2004. No. 4. Pp. 34–49. (rus)

15. Magadeev V.Sh. Heat supply sources and systems [Istochniki i sistemy teplosnabzheniya]. M.: ID "ENERGIYA", 2013. 272 p. (rus)

Information about the authors

Gubarev, Artem V. Senior lecturer. E-mail: artwo0248@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 20.02.2025

Для цитирования:

Губарев А.В. Оптимизация расчета тепловой схемы котельной с водогрейными котлами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 47–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-47-53

For citation:

Gubarev A.V. Optimization of the calculation of the thermal scheme of a boiler house with hot water boilers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 47–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-47-53