

УДК 697.341

DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-45-53

**ВЫБОР ИСТОЧНИКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ****канд. техн. наук, доц. А.М. НИЯКОВСКИЙ,  
Д.В. ЛАРИНА, А.В. БАТЕНКОВА****(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

*Разработана система научно обоснованных критериев, позволяющих выполнять оценку и оптимизацию работы источников систем теплоснабжения с учетом их энергетической эффективности, вида используемых первичных энергоносителей и эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу.*

*С использованием разработанной системы критериев выполнены численные исследования и получены новые результаты, показывающие количественную взаимосвязь между степенью термодинамической эффективности источника системы теплоснабжения, видом используемого первичного топлива или первичного энергоносителя и объемом эмиссии CO<sub>2</sub>.*

*На основании результатов численных исследований разработаны научно обоснованные рекомендации по выбору источника теплоснабжения в системах теплоснабжения с целью обеспечения высокой эффективности использования энергии первичного топлива и энергоносителей при одновременном сокращении объемов выброса диоксида углерода.*

**Ключевые слова:** парниковые газы, декарбонизация, углеродная нейтральность, энергетическая эффективность, тепловая генерация, численные исследования, оптимизация выбора.

**Введение.** Обеспечение рационального использования и экономного расходования энергетических ресурсов относится к важнейшим задачам, способствующим укреплению экономической безопасности государства. Этот принцип нашел отражение в Директиве Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 «О приоритетных направлениях укрепления экономической безопасности государства» (В редакции Указа Президента Республики Беларусь от 26.01.2016 г. № 26), который содержит требование о необходимости принятия соответствующих мер по экономии и бережливому использованию топливно-энергетических ресурсов во всех сферах производства, в том числе в строительстве и в жилищно-коммунальном хозяйстве<sup>1</sup>.

Однако этот комплекс задач должен решаться с учетом требований Киотского протокола и Парижского соглашения к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата<sup>2</sup>, к которому присоединилась Республика Беларусь и который предполагает сокращение выброса парниковых газов и, в частности, CO<sub>2</sub> в атмосферу с целью уменьшения антропогенного воздействия на природную среду.

Выполненный анализ научно-технической литературы показал, что разработка и обоснование методов повышения термодинамической эффективности преобразования первичной энергии в тепловую для целей теплоснабжения должны осуществляться с учетом эмиссии парниковых газов в атмосферу, влияние которой в данном контексте исследовано еще не в полной мере. В силу этого разработка научно-методических основ выбора источников тепловой энергии в системах теплоснабжения, базирующихся на реализации такого подхода, является актуальной, чему и посвящена настоящая работа.

**Цель исследования:** разработать научно-обоснованные рекомендации по выбору вида топлива и характеристик источников теплоснабжения, обеспечивающие снижение потребления первичного органического топлива и, как следствие, сокращение эмиссии парниковых газов в окружающую природную среду.

**Объект исследования:** системы теплоснабжения.

**Предмет исследования:** энергетическая и экологическая эффективность тепловой генерации.

**Теоретическая часть.** Объем эмиссии CO<sub>2</sub> за некоторый заданный период времени в общем случае, основываясь на имеющихся физических и термодинамических представлениях, можно представить в виде обобщенной функции, выражающей качественную зависимость величины эмиссии от объема конечного потребления тепловой энергии абонентами системы теплоснабжения, эффективности преобразования первичного топлива в тепловую энергию в теплогенерирующем оборудовании источника теплоснабжения и удельной эмиссии CO<sub>2</sub>, присущей используемому топливу или энергоносителю.

$$M_{CO_2} = \frac{W_{fec} + \Delta W_{los}}{\eta_{hg}} \cdot K_{CO_2}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Директива Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 «О приоритетных направлениях укрепления экономической безопасности государства» (В редакции Указа Президента Республики Беларусь от 26.01.2016 г. № 26. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 28.01.2016, 1/16252).

<sup>2</sup> Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 29 сентября 2021 г. № 553 «Об установлении определяемого на национальном уровне вклада Республики Беларусь в сокращение выбросов парниковых газов до 2030 года».

где  $M_{CO_2}$  – общий объем эмиссии  $CO_2$  в течение заданного периода времени;  
 $W_{fec}$  – объем конечного потребления энергии потребителями в течение заданного периода времени;  
 $W_{los}$  – потери энергии при передаче от источника к потребителям в течение заданного периода времени;  
 $\eta_{hg}$  – эффективность преобразования энергии первичного энергоносителя на источнике теплоснабжения;  
 $K_{CO_2}$  – удельный выход  $CO_2$  на единицу расхода энергии использованного первичного топлива или энергоносителя.

В данном контексте понятие «первичный энергоноситель» означает вид энергии, используемый для получения тепловой энергии на источнике теплоснабжения, например, электрическая энергия, а понятие «первичное топливо» относится к топливу, сжигаемому непосредственно на источнике теплоснабжения для получения тепловой энергии. При дальнейшем изложении оба эти понятия при необходимости будут объединены в одно: «первичные энергоносители».

Все величины, входящие в уравнение (1), могут быть однозначно определены, исходя из сведений о виде первичного энергоносителя, виде системы теплоснабжения, коэффициенте преобразования энергии и величине теплового потребления абонентами системы теплоснабжения за какой-либо наперед заданный период времени. Как следует из этой качественной зависимости, при известном конечном потреблении тепловой энергии снижения объема эмиссии  $CO_2$  можно добиться, используя первичные энергоносители с большей степенью углеродной нейтральности и/или теплогенерирующее оборудование с более высокой термодинамической эффективностью преобразования энергии.

Эмиссия  $CO_2$  в системах теплоснабжения обусловлена главным образом сжиганием органического топлива на источниках теплоты либо использованием электрической энергии, на производство которой также расходуется органическое топливо. В зависимости от вида системы теплоснабжения – централизованной или децентрализованной – могут применяться источники тепловой энергии, различающиеся способом получения энергии, видом используемых при этом топлива и энергоносителей, техническими и технологическими особенностями теплогенерирующего оборудования.

Существуют и широко применяются для целей теплоснабжения два основных варианта получения тепловой энергии:

- 1) в результате сжигания топлива (когенерационный и раздельный способы выработки тепловой и электрической энергии);
- 2) от природных возобновляемых источников (от солнца, из теплоты грунта, использование энергии падающей воды).

Когенерационная выработка предполагает получение электрической энергии на базе теплового потребления в результате использования энергии первичного топлива на едином источнике. При раздельной выработке электрическая и тепловая энергия вырабатывается на разных источниках, не имеющих между собой термодинамической связи: электрическая энергия генерируется на конденсационных электрических станциях (КЭС), потребляющих различные виды первичного топлива, а тепловая энергия – в разнообразных теплогенерирующих установках (ТГУ). Термодинамическая эффективность раздельного получения тепловой и электрической энергии значительно ниже, чем при совместной их выработке. В итоге удельные затраты первичного топлива на генерацию при совместной выработке энергии существенно ниже, а эксергетический КПД значительно выше, чем при раздельной её выработке [1]. Использование для тепловой генерации сбросных тепловых потоков различных энерготехнологических процессов – вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) – повышает термодинамические КПД самих этих процессов, что также ведет к снижению удельных показателей потребления первичного топлива [1].

В качестве основных видов первичного органического топлива, используемого в системах тепловой генерации, выступают:

- 1) природный газ;
- 2) мазут и котельно-печное топливо;
- 3) нефтяной сжиженный газ;
- 4) уголь;
- 5) биомасса (древесина, отходы ее заготовки и переработки).

Все эти виды топлива различаются теплотворной способностью, массой атомов углерода в общей массе топлива и, следовательно, объемами эмиссии  $CO_2$ , а также способом организации процесса их сжигания. В качестве первичного энергоносителя для выработки тепловой энергии на источниках теплоснабжения также может использоваться электрическая энергия. В этом случае эмиссия  $CO_2$ , связанная с выработкой электроэнергии на электростанциях, должна относиться на теплогенерирующее оборудование источника теплоснабжения рассматриваемой системы теплоснабжения.

Если в качестве первичного энергоносителя для целей тепловой генерации потребляются различные тепловые вторичные энергетические ресурсы (ВЭР), полученные ранее при организации каких-либо технологических или теплотехнических процессов, в ходе которых расходовались органическое топливо или электрическая энергия, то такое потребление тепловых ВЭР не приводит к дополнительной эмиссии  $CO_2$ , так как весь объем эмиссии ранее уже был отнесен к этим технологическим или теплотехническим процессам.

Методы оценки объемов выбросов парниковых газов при использовании органических топлив основываются на двух показателях: количестве сожженного топлива и содержании в нём углерода [2]. Для расчета выбросов парниковых газов от стационарного сжигания топлива необходимо иметь данные о количестве использованного топлива и о коэффициентах удельных выбросов парниковых газов на единицу массы сожжённого топлива или на единицу теплотворной способности топлива. При этом данные оценки основываются на том, что полнота сжигания топлива максимальна [2].

В результате анализа имеющейся научно-технической информации<sup>3</sup> и данных, приведенных в работе [3], выполнено обобщение в отношении удельной эмиссии CO<sub>2</sub> при сжигании различных видов топлива, результаты которого приведены на рисунке 1.

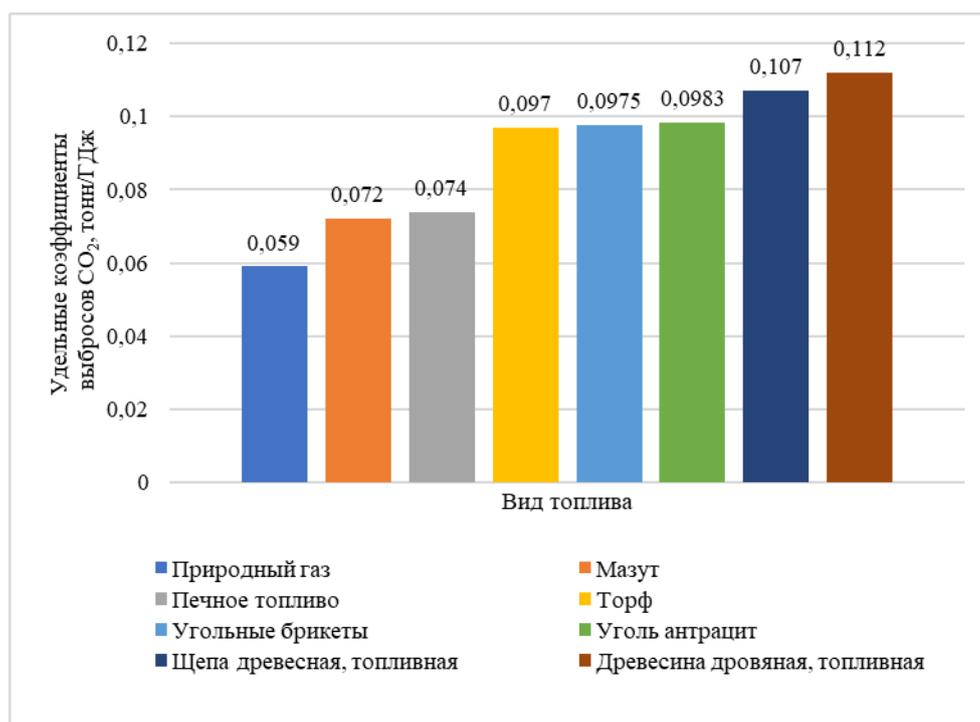


Рисунок 1. – Значения удельных коэффициентов эмиссии CO<sub>2</sub> для различных органических топлив

Как следует из гистограммы на рисунке 1, наименьшей удельной эмиссией CO<sub>2</sub> характеризуются природный газ, мазут и печное топливо, а наибольшей – древесное топливо разных видов.

**Разработка критериев выбора.** Критерии выбора вариантов теплоснабжения применительно к рассматриваемой задаче минимизации выбросов парниковых газов в окружающую среду в качестве требований к ним должны учитывать:

- вид топлива или первичного энергоносителя;
- степень централизации системы теплоснабжения и связанные с ней путевые тепловые потери;
- энергетическую эффективность преобразования первичной энергии на источнике теплоснабжения в тепловую энергию.

Согласно этому подходу в качестве комплексного критерия выбора может быть предложен следующий размерный комплекс, в значительной мере соответствующий сформулированным выше требованиям:

$$M_{Q,CO_2} = \frac{Q_{fec}}{\eta_{hg} \eta_{netw}} \cdot k_{окисл} \cdot K_{CO_2} \cdot (1 - \psi), \quad (2)$$

где  $M_{Q,CO_2}$  – общий объем эмиссии CO<sub>2</sub> при тепловой генерации в течение заданного периода времени, тонн/период;

<sup>3</sup> Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Выбросы и поглощение парниковых газов. Правила расчета выбросов за счет внедрения мероприятий по энергосбережению, возобновляемых источников энергии: ТКП 17.09-01-2011 (02120). – Введ. 01.01.2012 (Введен впервые). – Минск: М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 2012. – 34 с.

$Q_{fec}$  – объем конечного потребления тепловой энергии потребителями в течение заданного периода времени, ГДж/период;

$\Delta Q_{los}$  – потери тепловой энергии при передаче от источника к потребителям в течение заданного периода времени, ГДж/период;

$\eta_{hg}$  – эффективность преобразования энергии первичного энергоносителя на источнике теплоснабжения в тепловую энергию;

$\eta_{netw}$  – КПД системы транспорта тепловой энергии;

$K_{CO_2}$  – удельный выход  $CO_2$  на единицу расхода энергии использованного первичного топлива или энергоносителя при тепловой генерации, тонн $CO_2$ /ГДж;

$k_{окисл}$  – коэффициент окисления углерода топлива,  $k_{окисл} < 1$ ;

$\psi$  – показатель, характеризующий степень углеродной нейтральности источника первичной энергии для целей тепловой генерации, принимающий значения от 0 до 1.

Предлагаемый в данной работе показатель углеродной нейтральности  $\psi$  должен оцениваться, исходя из следующих предпосылок: он принимается равным 1, если в качестве первичного энергоносителя для целей тепловой генерации используются тепловые ВЭР с достаточным температурным потенциалом, солнечная энергия, электрическая энергия, полученная от ветряных и/или солнечных электростанций, ГЭС и АЭС; в случае прямого сжигания органического топлива этот показатель будет равным нулю. При использовании электрической энергии, полученной от энергосистемы, а также при использовании низкпотенциальных тепловых ВЭР с применением тепловых насосов, имеющих электрический привод, показатель  $\psi$  принимает значения больше нуля, но меньше единицы в зависимости от удельного веса в энергетическом приходе углеродно-нейтральных компонентов.

В качестве показателя эффективности преобразования энергии первичного энергоносителя на источнике теплоснабжения в тепловую энергию может быть применен любой из показателей. Вместе с тем, учитывая, что коэффициент  $K_{CO_2}$  (удельный выход  $CO_2$  на единицу расхода энергии использованного первичного топлива или энергоносителя при тепловой генерации, тонн $CO_2$ /ГДж) в справочной литературе отнесен к низшей теплоте сгорания топлива, то коэффициент  $\eta_{hg}$  должен приниматься, исходя из анализа теплового баланса источника теплоснабжения.

Наряду с приведенным выше показателем, представленным в виде уравнения (2), могут быть использованы и другие зависимости. В частности, в [4] предложено для оценки объема эмиссии  $CO_2$  при сжигании различных видов топлива использовать величину эмиссии, отнесенной к единице эксергии потока первичного энергоносителя, либо к величине использованной эксергии первичного энергоносителя, которая может рассматриваться как разность величины эксергетического потока энергоносителя на входе источника теплоснабжения и эксергии теплоты, отпущенной потребителям от коллекторов источника. Эти два потока связаны между собой через показатель эксергетического КПД источника теплоснабжения.

В такой интерпретации уравнение (2) может быть преобразовано к виду:

$$M_{Q,CO_2} = \frac{E_{fec}}{e \cdot \eta_{e,hg} \cdot \eta_{netw}} \cdot q_{LCV} \cdot k_{окисл} \cdot K_{CO_2} \cdot (1 - \psi), \quad (3)$$

где  $E_{fec}$  – величина эксергии теплового потока конечного потребления тепловой энергии потребителями в течение заданного периода времени, ГДж/период;

$e$  – удельная эксергия потока первичного энергоносителя, поступающего на источник теплоснабжения, ГДж/т;

$\eta_{e,hg}$  – эксергетический КПД<sub>e</sub> тепловой генерации;

$q_{LCV}$  – удельная низшая теплотворная способность первичного энергоносителя, ГДж/т.

Остальные величины в уравнении (3) имеют тот же смысл, что и в уравнении (2).

Фигурирующая в приведенных выше уравнениях величина  $Q_{fec}$  применительно к некоторой системе теплоснабжения является функцией изменяющейся во времени тепловой нагрузки и времени отпуска тепловой энергии. В общем случае она может быть определена следующим образом [5–7]:

$$Q_{fec} = 3600 \int_0^z Q dz = Q_{max} \cdot \frac{3600}{k_{hr}^{max}} \cdot z = 3600 \cdot Q_{max} \cdot \bar{Q} \cdot z, \quad (4)$$

где  $Q$  – мгновенная мощность конечного теплового потребления в данный момент времени, ГВт;

$z$  – продолжительность периода времени отпуска тепловой энергии, ч;

$k_{hr}^{max}$  – коэффициент часового максимума;

$\bar{Q}$  – относительная тепловая нагрузка в системе теплоснабжения.

Для случая, когда тепловое потребление состоит из расхода тепловой энергии на нужды обогрева зданий и на горячее водоснабжение, величина безразмерной относительной тепловой нагрузки системы теплоснабжения может быть определена по следующей предлагаемой нами зависимости:

$$\bar{Q} = \frac{Q_{hm} + Q_o^{\max} \cdot (t_{in} - t_{out}) / (t_{in} - t_{out}^{norm})}{Q_{hm} + Q_o^{\max}}, \text{ ГДж}, \quad (5)$$

где  $Q_{hm}$  – средняя нагрузка горячего водоснабжения, ГВт;  
 $Q_o^{\max}$  – максимальный расчетный расход тепловой энергии на обогрев зданий, ГВт;  
 $t_{in}$  – расчетная внутренняя температура обогреваемых помещений, °С;  
 $t_{out}$  – фактическая температура наружного воздуха, средняя для рассматриваемого периода, °С;  
 $t_{out}^{norm}$  – расчетная температура наружного воздуха для целей проектирования обогрева зданий, °С.

Первые два из перечисленных выше членов уравнения (5) являются проектными значениями. Расчетная внутренняя температура обогреваемых помещений для проектирования систем теплоснабжения принимается равной 18 °С<sup>4</sup>. Расчетная температура наружного воздуха для целей проектирования систем обогрева зданий принимается равной температуре наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92, сведения о которой содержатся в ТНПА.

Уравнения (3)–(5) представляют собой набор критериев и зависимостей, позволяющих выполнить оценку систем теплоснабжения с позиции их энергетической эффективности и углеродной нейтральности. Они составляют разработанное научно-методическое обеспечение, с помощью которого представляется возможным выполнять исследование различных систем теплоснабжения на эмиссию CO<sub>2</sub> в атмосферу.

**Численные исследования модельных систем теплоснабжения.** С использованием полученных критериев и зависимостей выполнен анализ энергетической эффективности и углеродной нейтральности различных модельных систем теплоснабжения равной тепловой мощности, но разного устройства, использующих различные виды энергоносителей. Дискретный ряд таких модельных систем и их характеристики для теплоснабжения района жилой застройки, в котором проживает около 10 тыс. человек, представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Варианты принятых к исследованию модельных систем теплоснабжения и их характеристика

№ варианта	Описание системы теплоснабжения	Тепловая мощность по конечному потреблению, $Q_{fec}$ , ГВт	Вид топлива	КПД тепловой генерации, $\eta_{hg}$	КПД системы транспорта теплоты, $\eta_{netw}$
1	Централизованная	0,015	природный газ	0,92	0,9
2	Централизованная	0,015	мазут	0,91	0,9
3	Централизованная	0,015	уголь	0,75	0,9
4	Централизованная	0,015	дрова	0,6	0,9
5	Централизованная	0,015	тепловые ВИЭ и ВЭР, тепловой насос с COP = 3	КПД генерации электроэнергии равен 0,385	0,9
6	Децентрализованная	0,015	природный газ	0,9	0,99
7	Децентрализованная	0,015	мазут	0,89	0,99
8	Децентрализованная	0,015	уголь	0,75	0,99
9	Децентрализованная	0,015	дрова	0,55	0,99
10	Децентрализованная	0,015	тепловые ВИЭ и ВЭР, тепловой насос с COP = 3	КПД генерации электроэнергии равен 0,385	0,99

<sup>4</sup> Тепловые сети. Строительные нормы Республики Беларусь: СН 4.02.01-2019. – Введ. 09.07.2020 (Введены впервые). – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 43 с.

Варианты 5 и 10 предполагают потребление низкопотенциальных тепловых ресурсов (ВИЭ или ВЭР) с использованием теплового насоса, имеющего коэффициент преобразования электрической энергии в тепловую  $COP=3$ . В этом случае коэффициент  $\psi=2/3$ . При этом суммарный КПД генерации и транспорта электрической энергии принимается равным 0,385. Это значение соответствует удельным расходам топлива на отпуск и транспорт электрической энергии в Белорусской энергосистеме<sup>5</sup>.

С использованием созданного научно-методического обеспечения и математической модели было выполнено сравнение различных вариантов систем теплоснабжения, описанных в таблице 1, по величине валового выброса  $CO_2$  в окружающую среду при тепловой генерации. Временной период  $z$  для расчетов принят равным 5000 ч/год. Коэффициент окисления углерода топлива, учитывая сравнительный характер анализа, принят равным 1.

Расчеты выполнены для климатических условий города Новополоцка. Результаты расчетов представлены на рисунках 2 и 3 и в таблице 2.

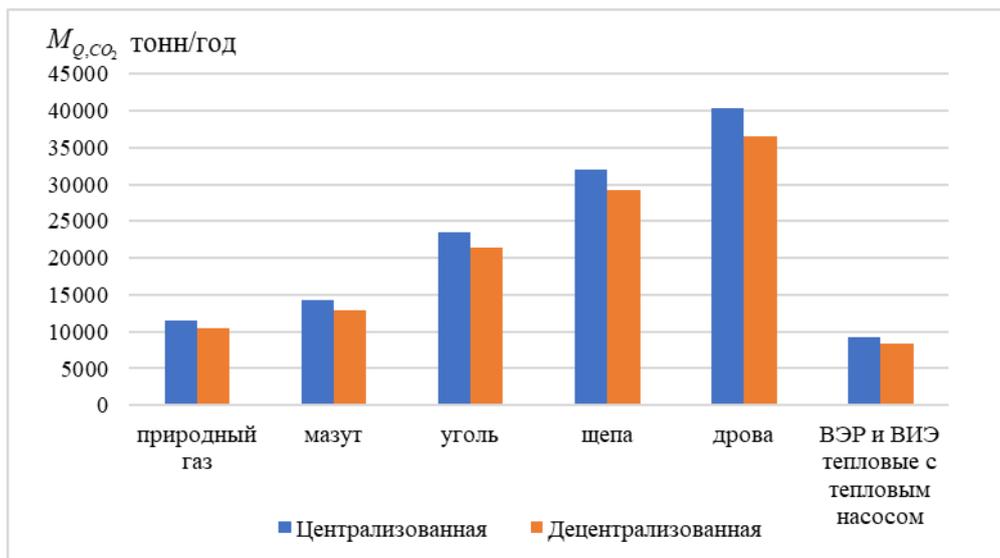


Рисунок 2. – Сравнительный анализ годовой эмиссии  $CO_2$  для различных конфигураций модельной системы теплоснабжения при коэффициенте окисления  $k_{окисл}=1$

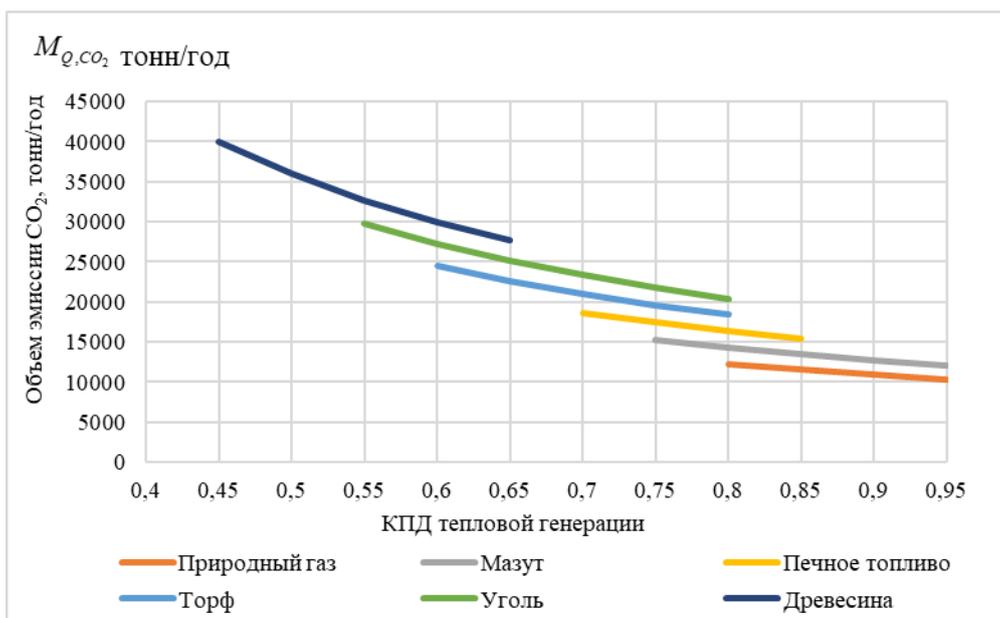


Рисунок 3. – Зависимость валового выброса  $CO_2$  в окружающую среду от вида топлива и энергетической эффективности системы теплоснабжения при коэффициенте окисления  $k_{окисл}=1$

<sup>5</sup> Удельные расходы топлива на отпуск электро- и теплоэнергии и потери в электро- и теплосетях, используемые в 2022 году в расчетах экономии топливно-энергетических ресурсов. URL: [https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka/30230201\\_sprav](https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka/30230201_sprav).

Таблица 2. – Результаты расчетов параметров работы и величины эмиссии CO<sub>2</sub> для анализируемых модельных систем теплоснабжения, описанных в таблице 1, с использованием разработанной математической модели при коэффициенте окисления  $k_{\text{окисл}}=1$  и времени работы системы 5000 часов

Показатель	Централизованная система						Децентрализованная система					
	при-родный газ	мазут	уголь	щепа	дрова	ВЭР и ВИЭ тепловые с тепловым насосом	при-родный газ	мазут	уголь	щепа	дрова	ВЭР и ВИЭ тепловые с тепловым насосом
Максимальная тепловая нагрузка, $Q_{\text{max}}$ , ГВт	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Относительная тепловая нагрузка, $\bar{Q}$	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599
Конечное тепловое потребление, $Q_{\text{фес}}$ , ГДж	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791	161791
КПД тепловой генерации	0,92	0,91	0,75	0,6	0,5	0,385	0,92	0,91	0,75	0,6	0,5	0,385
КПД тепловой сети	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Удельный выход CO <sub>2</sub> , $K_{\text{CO}_2}$ , т/ГДж	0,059	0,072	0,098	0,107	0,112	0,059	0,059	0,072	0,098	0,107	0,112	0,059
Доля использования ВЭР и ВИЭ, $\psi$	0	0	0	0	0	0,667	0	0	0	0	0	0,667
Число часов отпуска тепловой энергии, $z$ , ч/год	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
$M_{Q, \text{CO}_2}$ , т/год	11529	14223	23490	32059	40268	9183	10481	12930	21354	29144	36607	8348

**Обсуждение полученных результатов.** Как следует из рисунка 2, валовой выброс CO<sub>2</sub> от централизованных систем теплоснабжения превышает таковой от децентрализованных систем, что объясняется существующими непроизводительными потерями энергии в централизованных системах, связанными с транспортом теплоносителя по тепловым сетям. Важно отметить, что использование в качестве источника энергии низкопотенциальных тепловых ВЭР или ВИЭ с применением тепловых насосов позволяет добиться снижения валового выброса CO<sub>2</sub> не менее чем на 20% по сравнению с любыми другими видами источников теплоснабжения и применяемых на них видах топлива.

Как следует из рисунка 3, для рассмотренных модельных систем теплоснабжения при равной величине конечного потребления тепловой энергии замена природного газа древесным топливом ведет к увеличению объема поступления CO<sub>2</sub> в окружающую среду с 10–15 тыс. тонн до 28–40 тыс. тонн в год, то есть в среднем почти в 3 раза.

Полученные результаты относятся к принятому при расчетах условию, что коэффициент окисления углерода топлива  $k_{\text{окисл}}=1$ . Для сравнительного анализа различных вариантов систем теплоснабжения такое допущение можно считать корректным. Вместе с тем, при оценке абсолютных показателей объемов эмиссии CO<sub>2</sub> величину этого коэффициента необходимо задавать, исходя из конкретных условий сжигания топлива. Очевидно, что существует взаимосвязь между КПД тепловой генерации и степенью окисления топлива, так как недостаточное окисление углерода в топливе объективно приводит к снижению КПД тепловой генерации. Низкий КПД тепловой генерации, как правило, связан с неполнотой сжигания топлива. Следует ожидать, что в случае учёта при расчётах реального значения коэффициента  $k_{\text{окисл}}$  темпы роста валового выброса CO<sub>2</sub> при переходе от газообразного топлива к жидкому и/или к твердому будут несколько ниже, чем это следует из приведённых выше графиков. Тем не менее, общая полученная в данной работе картина при сравнении различных видов топлива не претерпит существенного изменения.

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Разработана система критериев и зависимостей, позволяющая выполнять сравнение различных систем теплоснабжения по критерию эффективности и степени углеродной нейтральности:

– предложен критерий, связывающий величину конечного потребления тепловой энергии, энергоэффективность транспорта тепловой энергии, удельную эмиссию CO<sub>2</sub>, долю использования углеродно-нейтральных энергетических источников и энергетическую эффективность тепловой генерации на источнике теплоснабжения;

– предложен критерий, связывающий эксергию теплового потока в объеме конечного потребления тепловой энергии потребителями, долю использования углеродно-нейтральных источников тепловой энергии, эффективность транспорта тепловой энергии от источника к потребителям и эксергетическую эффективность тепловой генерации на источнике с объемами эмиссии CO<sub>2</sub>;

– сформулированы зависимости и подходы, позволяющие определить входящие в эти критерии величины.

2. Указанная система критериев и зависимостей может быть использована для оптимизации вариантов теплоснабжения с целью минимизации объемов потребления первичного топлива при одновременной минимизации валовых выбросов парниковых газов.

3. В результате применения разработанного научно-методического обеспечения и выполненного анализа модельных систем теплоснабжения установлено:

– переход от газообразного топлива к жидкому и твердому при неизменной величине конечного потребления тепловой энергии ведёт к росту валового выброса CO<sub>2</sub> по сравнению с газообразным топливом: для жидких топлив, в среднем, в 1,3 раза, для угля и торфа – в 1,9 раза, для древесного топлива – в 2,9 раза;

– объем эмиссии CO<sub>2</sub>, отнесенный к 1 ГДж конечного теплового потребления, составляет для систем теплоснабжения, использующих природный газ, 0,064 тонн/ГДж, при использовании жидкого топлива – 0,08 тонн/ГДж, при использовании угля и торфа – 0,12 тонн/ГДж, при использовании древесного топлива – 0,19 тонн/ГДж;

– установлено, что коэффициент окисления углерода топлива является масштабом суммарной величины относительных потерь тепловой энергии в результате химической и механической неполноты сгорания и он снижается по мере перехода от газообразного топлива к жидкому, а от него – к углю, торфу и древесному топливу, причем минимальные величины этого коэффициента следует отнести к древесному топливу;

– показано, что при использовании в качестве источника теплоснабжения низкопотенциальных тепловых ВЭР и ВИЭ с применением компрессионных тепловых насосов валовый выброс CO<sub>2</sub> в окружающую среду по сравнению с источниками, использующими природный газ, снижается не менее чем на 20%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
2. Ильшева Н.Н., Балдеску Е.В. Совершенствование методического инструментария количественной оценки выбросов парниковых газов с учетом международного опыта // Вестн. УрФУ. Сер. Экономика и управление. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 108–126.
3. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Определение химической энергии и эксергии древесных топлив // Системы. Методы. Технологии. – 2017 – № 1 (33). – С. 91–96.
4. Нияковский А.М. О некоторых аспектах выполнения эксергетического анализа теплоэнергетических систем с целью снижения выбросов CO<sub>2</sub> в окружающую среду // Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Витебск, 21–22 нояб. 2018 г. – Витебск: Витебский гос. технол. ун-т, 2018. – С. 259–261.
5. Теплоснабжение: учеб. для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков и др. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.
6. Теплоснабжение: учеб. пособие / В.Е. Козин, Т.А. Левина, А.П. Марков и др. – М.: Высш. шк., 1980. – 408 с.
7. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоиздат, 1982. – 360 с.

#### REFERENCES

1. Brodyanskii, V.M. (1973). *Eksergeticheskii metod termodinamicheskogo analiza*. Moscow: Energiya. (In Russ.).
2. Ilysheva, N.N. & Baldesku, E.V. (2017). Sovershenstvovanie metodicheskogo instrumentariya kolichestvennoi otsenki vybrosov parnikovyykh gazov s uchetom mezhdunarodnogo opyta [Improving methodological tools quantitative estimates of greenhouse gas emissions based on international experience]. *Vestn. UrFU. Ser. Ekonomika i upravlenie [Journal of applied economic resrarch]*, 16(1), 108–126. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Stepanov, V.S., Stepanova, T.B. & Starikova, N.V. (2017). Opredelenie khimicheskoi energii i eksergii drevesnykh topliv [Determination of chemical energy and exergy of wood fuels]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [The system. Methods. Technologies]*, 1(33), 91–96. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Niyakovskii, A.M. (2018). O nekotorykh aspektakh vypolneniya eksergeticheskogo analiza teploenergeticheskikh sistem s tsel'yu snizheniya vybrosov SO<sub>2</sub> v okruzhayushchuyu sredu. In *Innovatsionnye tekhnologii v tekstil'noi i legkoi promyshlennosti: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Vitebsk, 21–22 noyab. 2018 g.* (259–261). Vitebsk: Vitebskii gos. tekhnol. un-t. (In Russ.).
5. Ionin, A.A., Khlybov, B.M., Bratenkov, V.H., & Terletskaya, E.H. (1982). *Teplosnabzhenie: ucheb. dlya vuzov*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
6. Kozin, V.E., Levina, T.A., Markov, A.P., Pronina, I.B. & Slemzin, V.A. (1980). *Teplosnabzhenie: ucheb. posobie*. – Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
7. Sokolov, E.Ya. (1982). *Teplofikatsiya i teplovye seti: ucheb. dlya vtuzov*. Moscow: Energoizdat. (In Russ.).

Поступила 06.05.2023

**THE CHOICE OF A SOURCE OF THERMAL ENERGY IN HEAT SUPPLY SYSTEMS,  
TAKING INTO ACCOUNT THE REQUIREMENTS OF DECARBONIZATION  
AND ENERGY CONSERVATION**

**A. NIYAKOVSKII, D. LARINA, A. BATENKOVA**  
*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*A system of scientifically based criteria has been developed to evaluate and optimize the operation of heat supply systems sources, taking into account their energy efficiency, the type of primary energy carriers used and CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere.*

*Using the developed system of criteria, numerical studies were performed and new results were obtained showing a quantitative relationship between the degree of thermodynamic efficiency of the source of the heat supply system, the type of primary fuel or primary energy carrier used and the volume of CO<sub>2</sub> emissions.*

*Based on the results of numerical studies, scientifically based recommendations have been developed for the selection of a heat supply source in heat supply systems in order to ensure high efficiency of primary fuel and energy use while reducing carbon dioxide emissions.*

**Keywords:** *greenhouse gases, decarbonization, carbon neutrality, energy efficiency, thermal generation, numerical studies, optimization of choice.*