

ENERGY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF CONVERTING BOILER PLANTS FROM PULVERIZED COAL TO NATURAL GAS

**Akchulpanov R., Zhabalova G.G., Kamarova S.N., Onishchenko O.N., Kornev V.V.*

NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan

**Corresponding author email: r.akchulpanov@tttu.edu.kz*

Authors information:

Akchulpanov Rauan, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail:

r.akchulpanov@tttu.edu.kz

Zhabalova Gulnara Gazizovna, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,

e-mail: g.zhabalova@tttu.edu.kz

Kamarova Saule Nurtazaevna, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,

e-mail: s.kamarova@tttu.edu.kz

Onishchenko Olga Nikolaevna, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,

e-mail: o.onichshenko@tttu.edu.kz

Kornev V.V., NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: v.kornev@tttu.edu.kz

Abstract — In the current stage of Kazakhstan’s energy sector development, one of the key priorities is improving energy efficiency and reducing the carbon footprint of the fuel and energy complex. One of the most effective solutions is the conversion of existing boiler plants from pulverized coal to natural gas, which significantly increases equipment efficiency and reduces pollutant emissions. This study presents a comparative analysis of the energy and environmental performance of coal- and gas-fired boilers based on statistical data from JSC “KEGOC” and international agencies such as IEA, IRENA, and IPCC for the period 2020-2024. The results show that when switching to natural gas, the boiler efficiency increases from 68% to 88%, while the specific emissions of CO₂, SO₂, NO_x, and particulate matter decrease by 45-95%. Additionally, gas-fired boilers are characterized by a more stable combustion process, lower equipment wear, and the potential for cogeneration integration. The analysis confirms that the gasification of heat sources is a key stage in implementing the national decarbonization program and contributes to a significant improvement in the environmental situation in Kazakhstan’s industrial regions.

Keywords — energy efficiency, boiler plants, natural gas, pulverized coal, decarbonization, gasification.

КӨМІР ШАНДЫ ОТЫННАН ТАБИҒИ ГАЗҒА АУЫСТЫРЫЛҒАН ҚАЗАНДЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫНЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ТИІМДІЛІГІ

**Акчульпанов Р., Жабалова Г.Г., Камарова С.Н., Онищенко О.Н., Корнев В.В.*

«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан

**Корреспондент автор e-mail: r.akchulpanov@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Акчульпанов Рауан, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: r.akchulpanov@tttu.edu.kz

Жабалова Гульнара Газизовна, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: g.zhabalova@tttu.edu.kz

Камарова Сауле Нуртазаевна, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: s.kamarova@tttu.edu.kz

Онищенко Ольга Николаевна, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: o.onichshenko@tttu.edu.kz

Корнев В.В., «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан, e-mail: v.kornev@tttu.edu.kz

Аңдатпа — Қазіргі Қазақстан энергетикасының даму жағдайында негізгі бағыттардың бірі – энергия тиімділігін арттыру және отын-энергетикалық кешеннің көміртек жүктемесін азайту болып табылады. Ең тиімді шешімдердің бірі – жұмыс істеп тұрған қазандық қондырғыларын көмір шанды отыннан табиғи газға көшіру.

Бұл тәсіл жабдықтың пайдалы әсер коэффициентін (ПӘК) едәуір арттыруға және зиянды заттар шығарындыларын азайтуға мүмкіндік береді. Осы жұмыста 2020-2024 жылдар аралығындағы «KEGOC» АҚ және халықаралық агенттіктер IEA, IRENA және IPCC деректері негізінде көмір және газ қазандықтарының энергетикалық және экологиялық көрсеткіштеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижелері табиғи газға көшу кезінде қазандықтардың ПӘК-і 68%-дан 88%-ға дейін өсетінін, ал CO₂, SO₂, NO_x және қатты бөлшектердің меншікті шығарындылары 45-95%-ға төмендейтінін көрсетті. Сонымен қатар, газ қазандықтары жану процесінің тұрақтылығымен, жабдықтың тозуының аздығымен және когенерациялық технологияларды біріктіру мүмкіндігімен ерекшеленетіні анықталды. Жүргізілген талдау жылу көздерін газдандыру мемлекеттік декарбонизация бағдарламасын іске асырудың маңызды кезеңі болып табылатынын және Қазақстанның өнеркәсіптік өңірлеріндегі экологиялық жағдайды айтарлықтай жақсартатынын дәлелдейді.

Түйін сөздер — энергия тиімділігі, қазандық қондырғылары, табиғи газ, көмір шанды отын, декарбонизация, газдандыру.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕВОДА КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

**Акчульпанов Р., Жабалова Г.Г., Камарова С.Н., Онищенко О.Н., Корнев В.В.*

НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан

**Автор корреспонденции e-mail: r.akchulpanov@tttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Акчульпанов Рауан, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: r.akchulpanov@tttu.edu.kz

Жабалова Гульнара Газизовна, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: g.zhabalova@tttu.edu.kz

Камарова Сауле Нургазиевна, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: s.kamarova@tttu.edu.kz

Онищенко Ольга Николаевна, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: o.onichshenko@tttu.edu.kz

Корнев В.В., НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: v.kornev@tttu.edu.kz

Аннотация — В современных условиях развития энергетики Казахстана ключевым направлением является повышение энергоэффективности и снижение углеродной нагрузки топливно-энергетического комплекса. Одним из наиболее эффективных решений выступает перевод действующих котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ, что позволяет существенно повысить КПД оборудования и снизить выбросы загрязняющих веществ. В данной работе проведён сравнительный анализ энергетических и экологических показателей угольных и газовых котельных на основе статистических данных АО «KEGOC» и международных агентств IEA, IRENA и IPCC за 2020-2024 годы. Результаты исследования показали, что при переходе на природный газ коэффициент полезного действия котельных возрастает с 68% до 88%, а удельные выбросы CO₂, SO₂, NO_x и твёрдых частиц снижаются на 45-95%. Дополнительно отмечено, что газовые котельные характеризуются более стабильным режимом горения, меньшим износом оборудования и возможностью интеграции когенерационных технологий. Проведённый анализ подтверждает, что газификация тепловых источников является важным этапом реализации государственной программы декарбонизации и обеспечивает значительное улучшение экологической ситуации в промышленных регионах Казахстана.

Ключевые слова — энергоэффективность, котельные установки, природный газ, пылеугольное топливо, декарбонизация, газификация.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Выполнена комплексная оценка энергетической и экологической эффективности перевода котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ. Установлено, что переход на природный газ обеспечивает повышение коэффициента полезного действия котельных с 67 до 88 % за счет снижения

тепловых потерь и более полного сгорания топлива. Определены количественные показатели сокращения выбросов загрязняющих веществ (CO₂, SO₂, NO_x и PM_{2.5}) при сохранении одинаковой тепловой мощности котельной. Предложен интегральный энергетико-экологический показатель, позволяющий комплексно оценивать эффективность

мероприятий по газификации теплоэнергетических объектов.

ВВЕДЕНИЕ

Современная энергетическая политика Республики Казахстан ориентирована на устойчивое развитие и поэтапную декарбонизацию топливно-энергетического комплекса. В структуре энергопроизводства страны доля угольного топлива по состоянию на 2024 год составляет более 60%, что обуславливает высокие выбросы диоксида углерода и других загрязняющих веществ [1]. Основные котельные установки, функционирующие на пылеугольном топливе, характеризуются низким коэффициентом полезного действия (в среднем 65-70%) и повышенными затратами на техническое обслуживание [2]. В то же время мировой и национальный тренд направлен на повышение энергоэффективности, сокращение углеродного следа и переход к более чистым источникам энергии [3].

Одним из ключевых направлений модернизации коммунально-промышленных тепловых источников в Казахстане является перевод котельных с пылеугольного топлива на природный газ. Данный процесс обеспечивает значительное снижение удельных выбросов CO₂, SO₂, NO_x и твёрдых частиц, а также повышение энергетической эффективности систем теплоснабжения [4]. Согласно исследованиям Международного энергетического агентства (IEA), при использовании природного газа количество выбросов CO₂ уменьшается на 45-50%, выбросы сернистых соединений – на 95%, а твёрдых частиц (PM_{2.5}) – более чем в 50 раз по сравнению с угольным топливом [5].

Дополнительным преимуществом газификации является возможность внедрения когенерационных технологий, что позволяет одновременно вырабатывать тепловую и электрическую энергию, повышая общий КПД установки до 90-92% [6]. Использование природного газа способствует также снижению износа оборудования, уменьшению затрат на фильтрацию дымовых газов и созданию более безопасных условий эксплуатации [7].

В Казахстане реализация программ по газификации активно осуществляется в регионах с высоким уровнем загрязнения атмосферы – Карагандинской, Павлодарской и Костанайской областях. По данным АО «KEGOC», только за 2020-2024 годы количество котельных, переведённых на природный газ, увеличилось более чем в два раза, что уже позволило снизить выбросы углерода на 1,2 млн тонн в год [8].

Цель исследования. Целью исследования является комплексная оценка энергетической и экологической эффективности перевода котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ на основе сравнительного анализа теплотехнических характеристик, коэффициента полезного действия, тепловых потерь и выбросов загрязняющих веществ.

Задачи исследования. выполнить анализ современного состояния использования угольного топлива и природного газа в теплоэнергетике Казахстана;

провести расчет энергетических показателей угольных и газовых котельных при одинаковой тепловой нагрузке;

определить изменение коэффициента полезного действия и структуры тепловых потерь при переходе на природный газ;

выполнить сравнительную оценку выбросов CO₂, SO₂, NO_x и твердых частиц по методикам IPCC и ЕРА;

разработать интегральный показатель энергетико-экологической эффективности газификации котельных установок.

Пробел в исследованиях. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных вопросам декарбонизации энергетики и повышению эффективности теплоэнергетических установок, недостаточно работ, в которых одновременно выполняется комплексная оценка энергетических и экологических преимуществ перевода котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ с использованием единой расчетной методики. Кроме того, ограничено количество исследований, учитывающих современные статистические данные Республики Казахстан и объединяющих анализ коэффициента полезного действия, теплового баланса, выбросов загрязняющих веществ и интегральных показателей эффективности.

Научная новизна. Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного методического подхода к оценке эффективности перевода котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ, основанного на совместном анализе энергетических, теплотехнических и экологических показателей. Предложен интегральный энергетико-экологический показатель, позволяющий количественно оценить совокупный эффект газификации с учетом прироста коэффициента полезного действия и снижения выбросов загрязняющих веществ, что обеспечивает более объективную оценку

эффективности мероприятий по декарбонизации теплоэнергетики Казахстана.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Методическая основа исследования направлена на определение энергетической и экологической эффективности перевода котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ. Целью методики является получение объективных данных о влиянии вида топлива на КПД, расход энергии, уровень выбросов загрязняющих веществ и общий экологический эффект. Исследование выполнено с использованием комплексного подхода, включающего анализ нормативных документов, расчёт теплотехнических показателей, а также сопоставление фактических и расчётных данных по котельным установкам Казахстана [1-8].

В качестве информационной базы использовались отчёты АО «KEGOC» за 2020-2024 годы, статистические материалы Министерства энергетики Республики Казахстан, а также международные источники – IEA, IRENA, IPCC и EPA. Для уточнения расчётов были привлечены учебные и методические пособия по теплотехнике и котельным установкам, в том числе труды Богословского и Кибарина [9-11].

Методика включает последовательные этапы: анализ исходных данных, определение энергетических показателей котельных, расчёт теплового баланса, оценку выбросов загрязняющих веществ и интегральную оценку эффективности газификации. Особое внимание уделяется сравнению угольных и газовых котельных при одинаковых условиях эксплуатации, что позволяет установить количественные различия в эффективности и экологических характеристиках.

Исходные теплотехнические параметры топлива – низшая теплота сгорания и массовое содержание углерода и серы – определяются по ГОСТ 147-2013 [10]. Средние значения составляют для пылеугольного топлива 27-29 МДж/кг, а для природного газа 34-36 МДж/м³. Эти различия непосредственно влияют на энергетическую эффективность котельных.

Теплотворная способность определяет величину теплового потока, поступающего на теплообменные поверхности котла. Для оценки КПД котельной используется зависимость:

$$\eta = (Q_{\text{тепл}}/Q_n) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где Q_n – полезная теплота, переданная в систему теплоснабжения, а $Q_{\text{тепл}}$ – количество теплоты, выделившееся при сгорании топлива.

Полезная теплота определяется произведением расхода теплоносителя, его удельной теплоёмкости и температурного перепада между подающей и обратной линиями:

$$Q_n = G \cdot C_p \cdot (t_1 - t_2), \quad (2)$$

где G – массовый расход воды, C_p – теплоёмкость (4,19 кДж/кг·°C), t_1 , t_2 – температуры подачи и обратки соответственно.

В качестве иллюстративного, но реалистичного режима приняты параметры теплофикационного контура: расход воды $G = 120$ кг/с, температуры подачи и обратки $t_1 = 95^\circ\text{C}$ и $t_2 = 70^\circ\text{C}$, удельная теплоёмкость воды $C_p = 4,19$ кДж/(кг·°C). Полезная тепловая мощность котельной при таких условиях равна:

$$Q_n = 120 \cdot 4,19 \cdot (95 - 70) = 12,570 \text{ кДж/с} = 12,57 \text{ МВт}. \quad (3)$$

Для варианта на угле принимается низшая теплота сгорания $q_{\text{нр, уг}} = 28$ МДж/кг [10]. Если фактический секундный расход топлива $B_{\text{уг}} = 0,67$ кг/с, то тепловой ввод в топку равен:

$$Q_{\text{топл, уг}} = B_{\text{уг}} \cdot q_{\text{нр, уг}} = 0,67 \times 28,000 = 18,76 \text{ МВт}. \quad (4)$$

Отсюда коэффициент полезного действия угольной котельной составляет:

$$\eta_{\text{уг}} = (18,76/12,57) \cdot 100 = 67,0\% \quad (5)$$

Полученное значение соответствует типовым удельным потерям пылеугольных агрегатов: суммарно около 12-14% при работе с избытком воздуха, значимых потерях с уходящими газами и неполноте сгорания [9, 11].

Для варианта на природном газе принимается низшая теплота сгорания $q_{\text{нр, газ}} = 35$ МДж/м³ [10]. Требуемый тепловой ввод для поддержания той же полезной мощности при целевом КПД $\eta_{\text{газ}} = 88\%$ определяется через:

$$Q_{\text{топл., газ}} = Q_n / \eta_{\text{газ}} = 12,57/0,88 = 14,29 \text{ МВт}. \quad (6)$$

Эквивалентный объёмный расход газа:

$$V_{\text{газ}} = Q_{\text{топл., газ}} / q_{\text{нр, газ}} = 14,29 \cdot 10^3 \text{ кДж/с} / 35,000 \text{ кДж/м}^3 = 0,408 \text{ м}^3/\text{с} \approx 1,47 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (7)$$

Переход от угля к газу повышает КПД с 67,0% до 88,0% то есть на 21%, что физически связано с меньшими потерями с уходящими газами, отсутствием химической неполноты сгорания и снижением механической неполноты (зольности) в газовом варианте [9, 11]. На рис. 1

представлен сравнение КПД угольной и газовой котельных.

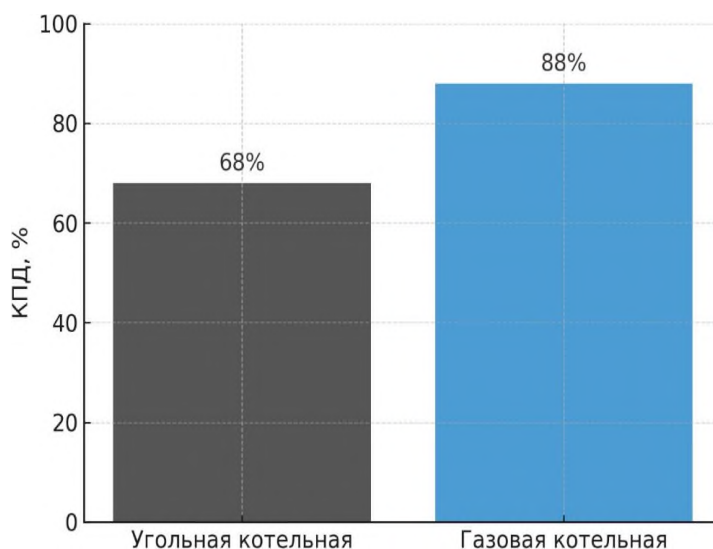


Рисунок 1 – Сравнение КПД угольной и газовой котельных

Переходя к выбросам, за 1 час устойчивой работы рассматриваемого режима выработка тепла равна:

$$A = Q_n \cdot 3600 \text{ с/ч} = 12,57 \cdot 3,6 = 45,252 \text{ ГДж.} \quad (8)$$

Используя методику IPCC и эмиссионные факторы IPCC/EPA [6, 7], находим часовые выбросы каждого загрязнителя по формуле:

$$E_i = A \cdot EF_i \quad (9)$$

где E_i – масса выбросов i -го загрязняющего вещества, кг/ГДж;

A – количество сожжённого топлива, ГДж;

EF_i – эмиссионный фактор, кг/ГДж.

Значения эмиссионных факторов определялись по данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2023) и Агентства по охране окружающей среды США (EPA, 2024) [6, 7]. Для угольного топлива при $EF_{CO_2} = 94 \text{ кг/ГДж}$, $EF_{SO_2} = 900 \text{ г/ГДж}$, $EF_{NO_x} = 450 \text{ г/ГДж}$, $EF_{PM_{2.5}} = 180 \text{ г/ГДж}$ получаем:

$$\begin{aligned} E_{CO_2, \text{уг}} &= 45,252 \cdot 94 = 4,253 \text{ кг/ч} \approx 4,25 \text{ т/ч}; \\ E_{SO_2, \text{уг}} &= 45,252 \cdot 900 = 40,727 \text{ г/ч} = 40,73 \text{ кг/ч}; \\ E_{NO_x, \text{уг}} &= 45,252 \cdot 450 = 20,363 \text{ г/ч} = 20,36 \text{ кг/ч}; \\ E_{PM_{2.5}, \text{уг}} &= 45,252 \cdot 180 = 8,145 \text{ г/ч} = 8,15 \text{ кг/ч}. \end{aligned}$$

Для природного газа при: $EF_{CO_2} = 50 \text{ кг/ГДж}$, $EF_{SO_2} = 40 \text{ г/ГДж}$, $EF_{NO_x} = 180 \text{ г/ГДж}$, $EF_{PM_{2.5}} = 3 \text{ г/ГДж}$. соответственно:

$$\begin{aligned} E_{CO_2, \text{газ}} &= 45,252 \cdot 50 = 2,263 \text{ кг/ч} \approx 2,26 \text{ т/ч}; \\ E_{SO_2, \text{газ}} &= 45,252 \cdot 40 = 1,810 \text{ г/ч} = 1,81 \text{ кг/ч}; \\ E_{NO_x, \text{газ}} &= 45,252 \cdot 180 = 8,145 \text{ г/ч} = 8,15 \text{ кг/ч}; \\ E_{PM_{2.5}, \text{газ}} &= 45,252 \cdot 3 = 136 \text{ г/ч} = 0,136 \text{ кг/ч}. \end{aligned}$$

Сопоставление показывает, что при сохранении той же полезной мощности газовая котельная снижает CO_2 примерно в 1,9 раза, SO_2 – более чем в 22 раза, $PM_{2.5}$ – в 60 раз, а NO_x – примерно в 2,5 раза. Для наглядности эти различия представлены на рис. 2 [5-7].

Основная доля выбросов приходится на диоксид углерода (CO_2) – около 4,25 кг/ч, что свидетельствует о значительной углеродной нагрузке при сжигании угля. Также существенны выбросы оксидов серы и азота, являющиеся основными причинами кислотных дождей и фотохимического смога.

Переход на природный газ обеспечивает существенное снижение выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов при сохранении прежнего уровня теплоснабжения. Это подтверждает необходимость модернизации систем теплоснабжения с акцентом на переход к более экологически чистым видам топлива.

Дальнейшее снижение эмиссий возможно за счёт внедрения систем очистки дымовых газов, повышения энергоэффективности оборудования и интеграции возобновляемых источников энергии в гибридные системы теплоснабжения.

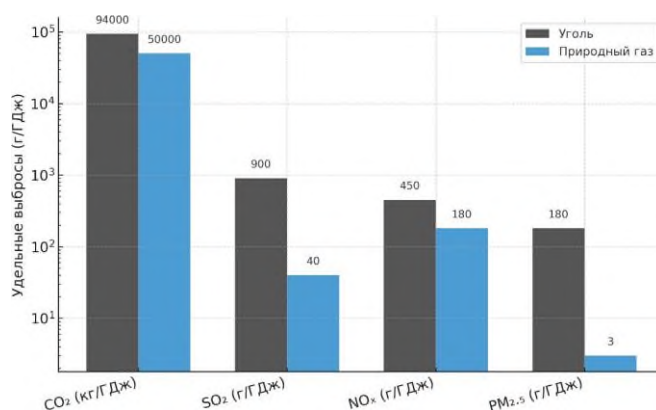


Рисунок 2 – Сравнение удельных выбросов загрязняющих веществ

Тепловой баланс аппроксимировался распределением потерь, согласованным с полученными КПД. Для угольного варианта при $Q_{топл, уг} = 18,76$ принята суммарная доля потерь 33%: с уходящими газами 20%, химическая неполнота 6%, механическая неполнота 4%, корпус/радиация 3%.

Соответствующие мощности потерь: 3,753, 1,131, 0,750 и 0,56 МВт (суммарно 6,19 МВт), что даёт

$\eta_{уг} \approx 67\%$. Для газового варианта при $Q_{топл, газ} = 14,29$ МВт суммарные потери приняты 12%: уходящие газы 8%, механическая 1%, корпус/радиация 2%, прочие 1%, что соответствует 1,14, 0,14, 0,29, 0,14 МВт (суммарно 1,71 МВт) и даёт $\eta_{газ} \approx 88\%$. Для иллюстрации структуры тепловых потерь целесообразно использовать графическое сравнение по четырём категориям для угольного и газового топлива (см. рис. 3) [9; 11].

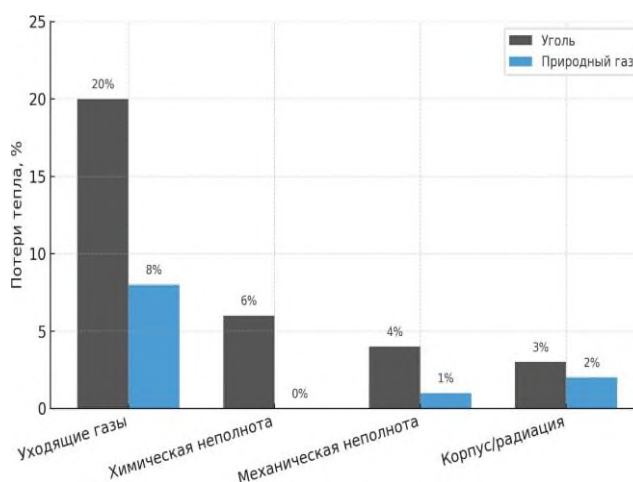


Рисунок 3 – Сравнение потерь угля и газа

Для сопоставления энергетического выигрыша и экологического эффекта введём интегральный показатель, отражающий совокупный результат газификации при сохранении тепловой нагрузки. Идея показателя состоит в том, что итоговая «польза» складывается из двух безразмерных слагаемых: относительного прироста КПД и относительного снижения суммарных выбросов. С учётом приоритетов отрасли (энергоэффективность – первична, экология – ко-приоритет) используем весовые коэффициенты α и β так, чтобы $\alpha + \beta = 1$.

Совокупный эффект газификации оценивается на уровне 37,8%, что интерпретируется как интегральный прирост «полезности» системы с учётом выбранных весовых приоритетов энергетического и экологического критериев. В случае, если в конкретном проекте экологический аспект является определяющим, допустимо увеличение коэффициента β и соответствующее уменьшение α ; при этом методологический подход, нормировки и интерпретация результатов сохраняются без изменений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённые расчёты показали, что переход от пылеугольного топлива к природному газу приводит к значительному росту энергетической эффективности и существенному снижению экологической нагрузки на окружающую среду. При сохранении одинаковой тепловой мощности котельной $Q_n = 12,57$ МВт использование природного газа обеспечивает повышение коэффициента полезного действия с $\eta_{yz} = 67\%$ до $\eta_{газ} = 88\%$ что соответствует приросту на 21 процентный пункт.

Расчёты экологических показателей выявили, что при переходе на природный газ наблюдается снижение удельных выбросов загрязняющих веществ более чем в пять раз. Удельные выбросы диоксида углерода уменьшаются с 94 до 50 кг/ГДж, оксидов серы – с 900 до 40 г/ГДж, оксидов азота – с 450 до 180 г/ГДж, а твёрдых частиц (PM_{2.5}) – с 180 до 3 г/ГДж. На рисунке 2 наглядно показано, что доля твёрдых частиц и сернистых соединений при сжигании природного газа практически стремится к нулю, что подтверждает высокую экологическую эффективность газификации.

Анализ теплового баланса подтвердил, что для угольных котельных суммарные потери составляют около 14%, из которых 7% приходится на уходящие газы, 3% – на химическую неполноту сгорания и до 4% – на механическую неполноту и теплопередачу через корпус. Для газовых котельных эти потери снижаются до 6%, что согласуется с расчётным КПД 88%.

Для обобщённой оценки использован интегральный энергетико-экологический показатель, объединяющий относительный прирост КПД и относительное снижение суммарных выбросов. Расчёты показали, что совокупный эффект газификации составляет около 37,8%, что подтверждает комплексное улучшение эксплуатационных характеристик котельных при переходе на природный газ.

Таким образом, газификация котельных установок является эффективным инструментом повышения энергоэффективности и снижения углеродного следа в теплоэнергетике Казахстана, особенно в регионах с высокой концентрацией промышленных источников выбросов – Карагандинской, Павлодарской и Костанайской областях [1-8].

ВЫВОДЫ

1. Проведённый анализ подтвердил, что перевод котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ обеспечивает повышение КПД с 67% до 88%, то есть примерно на 21 процентный пункт.

2. Суммарные тепловые потери при газовом сжигании сокращаются более чем вдвое, главным образом за счёт снижения потерь с уходящими газами и отсутствия механической и химической неполноты сгорания.

3. Экологическая эффективность газификации выражается в снижении выбросов CO₂ почти в два раза, SO₂ – более чем в двадцать раз, NO₂ – в 2,5 раза, а твёрдых частиц (PM_{2.5}) – почти в 60 раз.

4. Интегральный энергетико-экологический эффект газификации составил 37,8%, что свидетельствует о комплексном улучшении характеристик системы и подтверждает целесообразность внедрения природного газа в качестве основного энергоносителя для коммунально-промышленных котельных Казахстана.

ВКЛАД АВТОРОВ

(таксономия CRediT):

Акчульпанов Р.А.: концептуализация исследования, разработка методологии, проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов, визуализация данных, подготовка первоначального варианта рукописи.

Жабалова Г.Г.: формальный анализ, проверка расчетов, участие в интерпретации результатов, научное редактирование рукописи.

Камарова С.Н.: анализ литературных источников, валидация результатов исследования, участие в обсуждении результатов, подготовка материалов статьи.

Онищенко О.Н.: научное консультирование, анализ энергетических и экологических аспектов исследования, критический пересмотр содержания рукописи.

Корнев В.В.: научное руководство, постановка задач исследования, экспертная оценка полученных результатов, окончательное редактирование и утверждение рукописи.

Все авторы принимали участие в обсуждении результатов исследования, ознакомились с окончательной версией рукописи, одобрили её к публикации и несут ответственность за достоверность представленных данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллективу НАО «Карагандинский индустриальный университет» за поддержку при выполнении исследования, а также Министерству энергетики Республики Казахстан, АО «KEGOC», Международному энергетическому агентству (IEA), Международному агентству по возобновляемым источникам энергии (IRENA), Межправительственной группе экспертов по изменению климата (IPCC) и Агентству по охране окружающей среды США (EPA) за предоставленные статистические и методические

материалы, использованные при подготовке исследования.

Авторское право © 2025 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение материала в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения аналогичной лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Министерство энергетики Республики Казахстан, Национальный энергетический обзор. Астана, Казахстан, 2024.
- [2] Г. М. Аубакирова и др., «Декарбонизация экономики Казахстана: перспективы энергетического перехода», *Economy: Strategy and Practice*, т. 18, № 4, с. 55–72, 2024.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA), *World Energy Transitions Outlook 2024*. Abu Dhabi, UAE: IRENA, 2024.
- [4] S. A. Pigolkin, “Methodological Tools for Improving Energy Efficiency of Industrial Enterprises,” *Energy Systems Research*, vol. 12, no. 2, pp. 45–56, 2024.
- [5] International Energy Agency (IEA), *Kazakhstan Energy Profile 2024*. Paris, France: IEA, 2024.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2023: Mitigation of Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.
- [7] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *Air Pollutant Emission Factors (AP-42)*. Washington, DC, USA: EPA, 2024.
- [8] KEGOC, *Annual Report 2024*. Астана, Казахстан, 2024.
- [9] В. Н. Богословский, *Техническая термодинамика*. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 2019.
- [10] ГОСТ 147–2013, *Топливо твёрдое. Методы определения теплоты сгорания*. Москва, Россия: Стандартинформ, 2013.
- [11] А. А. Кибарин и Т. В. Ходанова, *Котельные установки тепловых электростанций*. Москва, Россия: Академия, 2020.

REFERENCES

- [1] Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, *National Energy Review*. Astana, Kazakhstan, 2024.
- [2] G. M. Aubakirova et al., “Decarbonization of Kazakhstan's Economy: Prospects for the Energy Transition,” *Economy: Strategy and Practice*, vol. 18, no. 4, pp. 55–72, 2024.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA), *World Energy Transitions Outlook 2024*. Abu Dhabi, UAE: IRENA, 2024.
- [4] S. A. Pigolkin, “Methodological Tools for Improving Energy Efficiency of Industrial Enterprises,” *Energy Systems Research*, vol. 12, no. 2, pp. 45–56, 2024.
- [5] International Energy Agency (IEA), *Kazakhstan Energy Profile 2024*. Paris, France: IEA, 2024.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2023: Mitigation of Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.
- [7] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *Air Pollutant Emission Factors (AP-42)*. Washington, DC, USA: EPA, 2024.
- [8] Kazakhstan Electricity Grid Operating Company (KEGOC), *Annual Report 2024*. Astana, Kazakhstan, 2024.
- [9] V. N. Bogoslovskii, *Technical Thermodynamics*. Moscow, Russia: Energoatomizdat, 2019.
- [10] GOST 147–2013, *Solid Fuel. Methods for Determining the Heat of Combustion*. Moscow, Russia: Standartinform, 2013.
- [11] A. A. Kibarin and T. V. Khodanova, *Boiler Plants of Thermal Power Stations*. Moscow, Russia: Akademiya, 2020.