

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco110989>

Оценка эффективности технологических мероприятий для управления риском здоровью населения при воздействии атмосферных выбросов многотопливных теплоэлектростанций

С.Б. Петров¹, Ю.В. Жернов²¹ Кировский государственный медицинский университет, Киров, Российская Федерация;² Первый Московский медицинский университет имени И.М. Сеченова (Сеченовский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Цель исследования. Дать оценку эффективности технологических мероприятий для управления риском здоровью населения при воздействии атмосферных выбросов многотопливных теплоэлектростанций (ТЭЦ).

Методы. Исследование выполнено на территории Кировской области в зоне влияния атмосферных выбросов ТЭЦ-4, модернизация которой включала внедрение низкотемпературного вихревого (НТВ) сжигания топлива, и ТЭЦ-3, в модернизацию которой входил запуск в эксплуатацию парогазовой установки для увеличения выработки электрической и тепловой энергии.

Исследование включало подготовку обучающей выборки для искусственной нейронной сети; моделирование рассеяния выбросов изучаемых ТЭЦ с расчётом приземных концентраций и оценкой канцерогенного и неканцерогенного рисков здоровью населения, а также относительного риска смертности, обращений и госпитализаций согласно методическим указаниям ВОЗ по качеству атмосферного воздуха. Для предприятий теплоэнергетики были построены прогнозные сценарии, включающие исходное состояние, модернизацию с помощью технологических и санитарно-технических мероприятий, изменения структуры топливного баланса.

Результаты. При использовании НТВ-технологии в сочетании с модернизацией системы пылегазоочистки прогнозируется статистически значимое ($p < 0,001$) снижение величины показателя канцерогенного риска в среднем на 80,67%, неканцерогенного риска — на 78,84%, относительных рисков смертности и обращений в медицинские организации — более чем на 80%. Применение газотурбинной установки позволило увеличить продукцию электрической энергии на 72,23%, тепловой — на 4,89%, статистически значимо ($p < 0,001$) снизить уровень канцерогенного риска на 44–60%, неканцерогенного риска — на 35–47%, относительных рисков смертности, обращений в медицинские организации и госпитализаций — на 33–64%.

Заключение. Применение для модернизации многотопливных ТЭЦ наилучших доступных технологий, включающих современные отечественные инженерно-технические разработки, позволяет при увеличении выработки электрической и тепловой энергии значительно снизить уровень риска здоровью населения, сохранив преимущество использования как твёрдого, так и газообразного топлива.

Ключевые слова: канцерогенный риск; неканцерогенный риск; здоровье населения; летучая зола; смертность; взвешенные вещества; многотопливная теплоэлектростанция.

Как цитировать:

Петров С.Б., Жернов Ю.В. Оценка эффективности технологических мероприятий для управления риском здоровью населения при воздействии атмосферных выбросов многотопливных теплоэлектростанций // Экология человека. 2022. Т. 29, № 11. С. 761–770.

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco110989>

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco110989>

Evaluation of the effectiveness of technological measures to manage the risk to public health when exposed to atmospheric emissions of multi-fuel combined heat and power plants

Sergey B. Petrov¹, Yury V. Zhernov²

¹ Kirov State Medical University, Kirov, Russian Federation;

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

AIM: To assess the effectiveness of technological measures to manage the risk to public health of exposure to atmospheric emissions from multi-fuel combined heat and power plants (CHP).

METHODS: The study involved modeling the dispersion of emissions from the thermal power plants, calculation of surface concentrations, assessment of carcinogenic and non-carcinogenic risks to public health, and estimating the relative risk of mortality, referrals and hospitalizations based on WHO guidelines on atmospheric air quality. Predictive scenarios were constructed for thermal power plants, including the initial state, modernization with the help of technological and sanitary measures, and changes in the structure of the fuel balance.

RESULTS: The use of low-temperature vortex fuel combustion technology in combination with a modernized dust and gas cleaning system significantly ($p < 0.001$) decreased the predicted carcinogenic risk index by an average of 80.67%, non-carcinogenic risk index by 78.84%, and relative mortality risks and referrals to medical organizations by more than 80%. The use of a gas turbine plant increased the production of electric energy by 72.23%, thermal energy by 4.89%, and significantly ($p < 0.001$) reduced the level of carcinogenic risk by 44–60%, non-carcinogenic risk by 35–47%, and relative risks of mortality, visits to medical organizations and hospitalizations by 33–64%.

CONCLUSION: The use of the best available technologies to modernize multi-fuel CHP plants significantly reduces the level of risk to public health while it increases the production of electric and thermal energy and maintaining the advantage of using both solid and gaseous fuels.

Keywords: carcinogenic risk; non-carcinogenic risk; public health; fly ash; mortality; airborne particle matter; multi-fuel power plant.

To cite this article:

Petrov SB, Zhernov YuV. Evaluation of the effectiveness of technological measures to manage the risk to public health when exposed to atmospheric emissions of multi-fuel combined heat and power plants. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2022;29(11):761–770.

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco110989>

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Энергетической стратегии России на периоды до 2024 года и до 2035 года одними из приоритетных направлений являются уменьшение отрицательного воздействия деятельности организаций топливно-энергетического комплекса на окружающую среду в условиях структурной диверсификации источников энергии, увеличения доли твёрдого и газообразного топлива на внутреннем потребительском рынке и повышения спроса на электрическую и тепловую энергию. Решение данной задачи намечено осуществить путём разработки и внедрения перспективных, экологически чистых технологий, повышения эффективности выработки продукции топливно-энергетического комплекса страны. При реализации данной стратегии существенный интерес могут представлять многотопливные теплоэнергетические комплексы, оборудование которых позволяет одновременно использовать твёрдое и газообразное топливо в различных соотношениях [1]. Обоснованность принятия управленческих решений по изменению топливного баланса, внедрению инновационных технологий в обязательном порядке должна сопровождаться оценкой риска здоровью населения и мероприятиями по снижению рисков до допустимого уровня [2, 3]. В связи с этим актуальное значение приобретают экологические исследования в районах размещения действующих многотопливных теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), на которых в рамках реализации стратегических задач проводятся мероприятия по модернизации производства тепловой и электрической энергии [4–7].

Цель исследования. Дать оценку эффективности технологических мероприятий для управления риском здоровью населения при воздействии атмосферных выбросов многотопливных теплоцентралей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на территории г. Кирова и г. Кирово-Чепецка Кировской области, в зоне влияния атмосферных выбросов городских многотопливных ТЭЦ-4 и ТЭЦ-3. На Кировской ТЭЦ-4 в период с 2008 по 2009 гг. в рамках отраслевой программы модернизации были выполнены работы по реконструкции энергетического котла БКЗ-210-140Ф путём внедрения низкотемпературной вихревой (НТВ) технологии совместного сжигания каменного угля, торфа, природного газа и мазута. Цели модернизации: продление ресурса оборудования, обеспечение номинальной нагрузки котла на торфе и повышение максимальной нагрузки при работе на угле и газе с высокой эффективностью сжигания топлива и низкими вредными выбросами, отказ от подсветки газом или мазутом при работе на торфе и угле.

С целью увеличения продукции электрической и тепловой энергии, улучшения экономических и экологических показателей в период 2010–2014 гг. в Кирово-Чепецке реализован крупный проект модернизации предприятия

теплоэнергетики «Реконструкция Кировской ТЭЦ-3 с применением ПГУ» (ПГУ — парогазовая установка). Модернизация ТЭЦ включала выведение из эксплуатации части устаревшего оборудования и постройку парогазового энергоблока с градирней вентиляторного типа.

Первичные данные о выбросах изучаемыми предприятиями в атмосферный воздух твёрдых частиц, диоксида серы, оксида углерода и оксидов азота получены из ежегодных материалов официальной государственной статистической отчётности по форме «№2-ТП (воздух)». Расчёт приземных концентраций компонентов атмосферных выбросов выполнен в программе AERMOD View (Lakes Environmental Software, Канада) с использованием цифровых моделей рельефа и почасовых метеоданных в зоне влияния выбросов предприятий. Штатными средствами программы AERMOD View в границах селитебных зон, находящихся на территории влияния атмосферных выбросов ТЭЦ, были построены рецепторные сетки и получены поля концентраций по каждому загрязнителю в составе атмосферных выбросов с шагом от 200 до 400 м.

Полученные данные о массе выбросов в атмосферу и приземных концентрациях компонентов атмосферных выбросов изучаемых ТЭЦ в рецепторных точках городских селитебных зон стали обучающей выборкой для нейросетевых моделей в составе специализированного программного обеспечения — информационной системы оценки и прогнозирования риска здоровью населения в зоне влияния атмосферных выбросов многотопливных ТЭЦ «ЭкоРиск — ТЭЦ» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2920666855 от 16.12.2020 г.). С помощью данной программы для предприятий теплоэнергетики был выполнен расчёт эмиссии в атмосферу и приземных концентраций твёрдых частиц, диоксида серы, оксида углерода и оксидов азота, а также расчёт риска здоровью для прогнозных сценариев работы ТЭЦ. Для ТЭЦ-4 рассматривали следующие прогнозные сценарии при выработке электрической энергии 1400 млн кВт·ч, тепловой энергии — 2500 тыс. Гкал:

- 1) состояние до модернизации;
- 2) переход всех энергетических котлов на НТВ-технологии сжигания топлива;
- 3) переход всех энергетических котлов на НТВ-технологии и модернизация системы пылегазоочистки (повышение эффективности до 99%).

Учитывая, что в результате модернизации ТЭЦ-3 была существенно увеличена выработка электроэнергии, для ТЭЦ-3 были созданы следующие сценарии:

- 1) состояние до модернизации: выработка электрической энергии — 720 млн кВт·ч, тепловой энергии — 1300 тыс. Гкал;
- 2) состояние до модернизации: годовая выработка электрической и тепловой энергии увеличена до 1250 млн кВт·ч и 1400 тыс. Гкал;
- 3) оборудование ТЭЦ модернизировано, состоит из парогазового энергоблока установленной

электрической мощностью 236 МВт, тепловой мощностью 106 тыс. Гкал/ч и паросилового энергоблока тепловой мощностью 400 тыс. Гкал/ч, годовая выработка электрической и тепловой энергии увеличена до 1250 млн кВт-ч и 1400 тыс. Гкал.

Оценка риска здоровью населения при воздействии атмосферных выбросов изучаемых предприятий теплоэнергетики проведена согласно Р 2.1.10.1920-04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду». Количественная оценка канцерогенной опасности выполнена путём расчёта суммарного индивидуального канцерогенного риска (ICR), неканцерогенной опасности — с помощью индекса опасности для острого (H_а) и хронического (H_х) ингаляционного действия. Расчёт относительного риска (ОР) смертности, обращений за медицинской помощью и госпитализаций при воздействии компонентов атмосферных выбросов изучаемых ТЭЦ осуществлён согласно методическим рекомендациям ВОЗ по качеству атмосферного воздуха [8].

Статистическая обработка результатов исследования выполнена с помощью программных пакетов Microsoft Excel и Statistica 10, включает методы описательной статистики и статистического анализа. Распределение количественных данных оценивали с помощью критерия Шапиро–Уилка. Все включённые в исследование количественные данные имели распределение, близкое к нормальному, и представлены в виде 95% доверительных интервалов (95% ДИ) средней арифметической. Статистическую значимость различий количественных данных оценивали при помощи однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с апостериорными сравнениями по критерию Ньюмена–Кейлса. В качестве критического уровня статистической значимости (*p*) выбран уровень *p* < 0,05 [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ

При переводе всех котлоагрегатов ТЭЦ-4 на НТВ-технологию совместного сжигания топлива без модернизации системы пылегазоочистки

Таблица 1. Сравнительная оценка канцерогенного и неканцерогенного риска здоровью населения при воздействии атмосферных выбросов ТЭЦ-4, 95% ДИ

Table 1. Comparative assessment of carcinogenic and non-carcinogenic risk to public health of exposure to atmospheric emissions of CHP-4, 95% CI

Доля твердого топлива, % The percentage of solid fuel in the fuel balance, %	Модели сценариев работы ТЭЦ-4 Models of CHP-4 operation scenarios					
	Период до внедрения технологии низкотемпературного вихревого сжигания The period before the implementation of low-temperature vortex technology		Применение технологии низкотемпературного вихревого сжигания In the conditions of application of low-temperature vortex technology		Технология низкотемпературного вихревого сжигания + модернизация системы пылегазоочистки In the conditions of application of low-temperature vortex technology and modernization of the exhaust gas purification system	
	Индивидуальный канцерогенный риск для населения, ICR Individual carcinogenic risk for population, ICR					
	взрослого adults	детского children	взрослого adults	детского children	взрослого adults	детского children
10	1,36×10 ⁻⁶ – 1,53×10 ⁻⁶	6,33×10 ⁻⁷ – 7,13×10 ⁻⁷	1,09×10 ⁻⁶ – 1,24×10 ⁻⁶	5,11×10 ⁻⁷ – 5,80×10 ⁻⁷	1,83×10 ⁻⁷ – 2,06×10 ⁻⁷	8,56×10 ⁻⁸ – 9,63×10 ⁻⁸
50	3,63×10 ⁻⁶ – 4,12×10 ⁻⁶	1,70×10 ⁻⁶ – 1,92×10 ⁻⁶	3,25×10 ⁻⁶ – 3,69×10 ⁻⁶	1,52×10 ⁻⁷ – 1,72×10 ⁻⁷	5,43×10 ⁻⁷ – 6,11×10 ⁻⁷	2,53×10 ⁻⁷ – 2,85×10 ⁻⁷
90	6,15×10 ⁻⁶ – 6,95×10 ⁻⁶	2,87×10 ⁻⁶ – 3,24×10 ⁻⁶	5,42×10 ⁻⁶ – 6,16×10 ⁻⁶	2,53×10 ⁻⁶ – 2,87×10 ⁻⁶	9,07×10 ⁻⁶ – 1,02×10 ⁻⁶	4,23×10 ⁻⁷ – 4,76×10 ⁻⁷
	Неканцерогенный риск (индекс опасности) для ингаляционного воздействия, HI Non-carcinogenic risk (hazard index) for inhalation exposure, HI					
	острого acute	хронического chronic	острого acute	хронического chronic	острого acute	хронического chronic
10	0,62–0,66	0,29–0,30	0,41–0,43	0,22–0,25	0,19–0,21	0,06–0,07
50	0,94–1,00	0,72–0,74	0,71–0,75	0,61–0,63	0,24–0,26	0,13–0,15
90	1,22–1,30	1,10–1,14	1,02–1,09	1,01–1,04	0,28–0,31	0,20–0,23

Примечание: уровень статистической значимости *p* < 0,001.
Note: *p* < 0.001 statistical significance level.

прогнозируется статистически значимое ($p < 0,001$) снижение величины показателя канцерогенного риска в среднем на 17,7%, неканцерогенного риска — на 13,98%. Статистически значимо наибольший эффект ($p < 0,001$) отмечен при доле твёрдого топлива в топливном балансе ТЭЦ от 10 до 50%: в данных условиях уровень канцерогенного риска снижается на 13,17 — до 28,22%, уровень неканцерогенной опасности при хроническом ингаляционном воздействии — до 20,0%. Относительно меньший эффект от модернизации наблюдается в условиях

значительного преобладания твёрдого топлива в топливном балансе (90% и более): отмечено снижение уровня канцерогенного риска на 11,68 — до 19,2%, уровня неканцерогенного риска при хроническом ингаляционном воздействии на 6,0 — до 10,0%.

Лучшие статистически значимые ($p < 0,001$) результаты по снижению риска здоровью населения при любых соотношениях твёрдого и газообразного топлива в топливном балансе показала модель, в которой НТВ-сжигание сочетается с модернизацией системы пылегазоочистки (путём

Таблица 2. Показатели относительного риска смертности, обращений за медицинской помощью и госпитализаций при воздействии атмосферных выбросов ТЭЦ-4, 95% ДИ

Table 2. Indicators of the relative risk of mortality, medical treatment, and hospitalization of exposure to atmospheric emissions of CHP-4, 95% CI

Показатели Relative risk indicators	Модели сценариев работы ТЭЦ-4 Models of CHP-4 operation scenarios		
	Период до внедрения технологии низкотемпературного вихревого сжигания The period before the implementation of low-temperature vortex technology	Применение технологии низкотемпературного вихревого сжигания In the conditions of application of low-temperature vortex technology	Технология низкотемпературного вихревого сжигания + модернизация системы пылегазоочистки In the conditions of application of low-temperature vortex technology and modernization of the exhaust gas purification system
Годовые показатели относительного риска Annual relative risk indicators			
Смертность от общих причин Non-accidental mortality	1,009–1,0200	1,007–1,016	1,001–1,004
Смертность от болезней системы кровообращения Circulatory mortality	1,003–1,031	1,002–1,026	1,001–1,006
Смертность от болезней органов дыхания Non-malignant respiratory mortality	1,017–1,057	1,014–1,047	1,003–1,009
Смертность от рака лёгких Lung cancer mortality	1,011–1,034	1,009–1,030	1,002–1,005
Суточные показатели относительного риска Daily indicators of relative risk			
Смертность от общих причин Non-accidental mortality	1,024–1,059	1,025–1,038	1,017–1,027
Смертность от болезней системы кровообращения Circulatory mortality	1,032–1,107	1,029–1,101	1,013–1,061
Смертность от болезней органов дыхания Non-malignant respiratory mortality	1,017–1,087	1,015–1,075	1,009–1,040
Смертность от острых форм болезней системы кровообращения Myocardial infarction and stroke mortality	1,010–1,074	1,009–1,068	1,006–1,033
Обращения за медицинской помощью по причине болезней системы кровообращения Daily hospital admissions for circulatory diseases	1,003–1,029	1,002–1,023	1,000–1,004
Обращения за медицинской помощью по причине бронхиальной астмы Daily hospital admissions for asthma	1,012–1,081	1,007–1,068	1,006–1,066

применением электрофильтров с эффективностью более 99%). При внедрении НТВ-технологии в сочетании с высокоэффективными электрофильтрами прогнозируется статистически значимое снижение величины показателя канцерогенного риска в среднем на 80,67%, неканцерогенного риска — на 78,84%. Согласно расчётным данным, при внедрении НТВ-технологии уровень неканцерогенного риска при остром ингаляционном воздействии (HIa) сокращается на 4–38%, при сочетании модернизации котлоагрегатов и системы пылегазоочистки — на 57–89% в зависимости от структуры топливного баланса (табл. 1).

Расчётная динамика показателей ОР представлена следующими значениями: при моделировании влияния модернизации топочного процесса котлоагрегата показатель годовой смертности от общих причин снизился на 21,15%, при модернизации котлоагрегата и системы пылегазоочистки — на 82,24%; годовая смертность от болезней системы кровообращения (БСК) снизилась на 14,19 и 80,54% соответственно; годовая смертность от болезней органов дыхания (БОД) — на 17,46 и 84,39%;

годовая смертность по причине рака лёгких — на 16,0 и 86,05%. Кроме того, отмечается отрицательная динамика аналогичных суточных показателей: суточной смертности от общих причин — на 34,53 и 54,64% соответственно; суточной смертности от БСК — на 5,02 и 43,10%; суточной смертности от БОД — на 22,27 и 55,61%; суточной смертности от острых форм БСК — на 8,33 и 54,17%; суточной обращаемости за медицинской помощью по поводу БСК — на 20,73 и 84,41%, по причине бронхиальной астмы — на 21,09 и 25,93% (табл. 2).

При сравнении с периодом до модернизации ТЭЦ выявлено, что запуск газотурбинной установки позволил статистически значимо ($p < 0,001$) снизить уровень канцерогенного риска на 47–60%, неканцерогенного риска при остром ингаляционном воздействии — на 35–42%, при хроническом ингаляционном воздействии — на 43–47%. При сравнении со сценарием повышения мощностей ТЭЦ без её модернизации установлено, что применение газотурбинной установки позволило статистически значимо ($p < 0,001$) снизить уровень канцерогенного риска на 67–75%, неканцерогенного риска при остром ингаляционном

Таблица 3. Сравнительная оценка канцерогенного и неканцерогенного риска здоровью населения при воздействии атмосферных выбросов ТЭЦ-3, 95% ДИ

Table 3. Comparative assessment of carcinogenic and non-carcinogenic risk to public health of exposure to atmospheric emissions of CHP-3, 95% CI

Доля твёрдого топлива, % Share of solid fuel, %	Модели сценариев работы ТЭЦ-3 Models of CHP-3 operation scenarios					
	ТЭЦ-3 до модернизации CHP-3 before modernization		Увеличение выработки электрической и тепловой энергии без модернизации ТЭЦ-3 Increase in the generation of electric and thermal energy without modernization of CHP-3		Модернизация с применением парогазовой установки, увеличение выработки электрической и тепловой энергии Modernization of CHP-3 with the launch of a combined cycle gas plant, increase in the production of electrical and thermal energy	
Индивидуальный канцерогенный риск для населения, ICR Individual carcinogenic risk for population, ICR						
	взрослого adults	детского adults	взрослого adults	детского children	взрослого adults	детского children
10	7,09×10 ⁻⁷ – 7,43×10 ⁻⁷	3,31×10 ⁻⁷ – 3,47×10 ⁻⁷	1,21×10 ⁻⁶ – 1,27×10 ⁻⁶	5,66×10 ⁻⁷ – 5,93×10 ⁻⁷	3,23×10 ⁻⁷ – 3,38×10 ⁻⁷	1,51×10 ⁻⁷ – 1,58×10 ⁻⁷
50	2,71×10 ⁻⁶ – 2,83×10 ⁻⁶	1,26×10 ⁻⁶ – 1,32×10 ⁻⁶	4,09×10 ⁻⁶ – 4,28×10 ⁻⁶	1,91×10 ⁻⁶ – 2,0×10 ⁻⁶	9,84×10 ⁻⁷ – 1,03×10 ⁻⁶	4,59×10 ⁻⁷ – 4,81×10 ⁻⁷
90	4,71×10 ⁻⁶ – 4,94×10 ⁻⁶	2,20×10 ⁻⁶ – 2,30×10 ⁻⁶	7,21×10 ⁻⁶ – 7,55×10 ⁻⁶	3,36×10 ⁻⁶ – 3,52×10 ⁻⁶	3,04×10 ⁻⁶ – 3,19×10 ⁻⁶	1,42×10 ⁻⁶ – 1,49×10 ⁻⁶
Неканцерогенный риск (индекс опасности) ингаляционного воздействия, HI Non-carcinogenic risk (hazard index) for inhalation exposure, HI						
	острого acute	хронического chronic	острого acute	хронического chronic	острого acute	хронического chronic
10	0,42–0,45	0,19–0,20	0,59–0,63	0,30–0,32	0,24–0,26	0,10–0,11
50	0,66–0,70	0,57–0,59	0,93–0,99	0,84–0,88	0,39–0,41	0,24–0,25
90	0,88–0,93	0,94–0,98	1,30–1,39	1,43–1,49	0,67–0,71	0,63–0,66

Примечание: уровень статистической значимости $p < 0,001$.

Note: $p < 0.001$ statistical significance level.

Таблица 4. Показатели относительного риска смертности, обращений за медицинской помощью и госпитализаций при воздействии атмосферных выбросов ТЭЦ-3, 95% ДИ

Table 4. Indicators of the relative risk of mortality, medical treatment and hospitalization of exposure to atmospheric emissions of CHP-3, 95% CI

Показатели Parameters	Модели сценариев работы ТЭЦ-3 Models of CHP-3 operation scenarios		
	ТЭЦ-3 до модернизации CHP-3 before modernization	Увеличение выработки электрической и тепловой энергии без модерниза- ции ТЭЦ-3 Increasing the generation of electrical and thermal energy without moderniza- tion of CHP-3	Модернизация с применением парогазовой установки, увели- чение выработки электриче- ской и тепловой энергии Modernization with the use of CCGT, increasing the generation of electrical and thermal energy
Годовые показатели относительного риска Annual relative risk indicators			
Смертность от общих причин Non-accidental mortality	1,005–1,013	1,007–1,016	1,003–1,008
Смертность от болезней системы кровообращения Circulatory mortality	1,001–1,014	1,002–1,026	1,001–1,005
Смертность от болезней органов дыхания Non-malignant respiratory mortality	1,009–1,030	1,014–1,047	1,004–1,016
Смертность от рака легких Lung cancer mortality	1,005–1,016	1,009–1,030	1,002–1,006
Суточные показатели относительного риска Daily indicators of relative risk			
Смертность от общих причин Non-accidental mortality	1,057–1,088	1,080–1,123	1,036–1,054
Смертность от болезней системы кровообращения Circulatory mortality	1,014–1,046	1,022–1,071	1,005–1,016
Смертность от болезней органов дыхания Non-malignant respiratory mortality	1,028–1,129	1,039–1,185	1,015–1,067
Смертность от острых форм болезней системы кровообращения Myocardial infarction and stroke mortality	1,004–1,033	1,007–1,050	1,002–1,012
Обращения за медицинской помощью по причине болезней системы кровообращения Daily hospital admissions for circulatory diseases	1,003–1,013	1,004–1,020	1,001–1,005
Обращения за медицинской помощью по причине бронхиальной астмы Daily hospital admissions for asthma	1,023–1,220	1,031–1,306	1,020–1,139

воздействии — на 53–59%, при хроническом ингаляционном воздействии — на 62–67% (табл. 3).

В условиях применения газотурбинной установки на ТЭЦ-3 наблюдается статистически значимое ($p < 0,001$) снижение показателя годовой смертности от общих причин, годовых показателей смертности по причине БСК, БОД и рака лёгких на 33–64% по сравнению с аналогичными показателями в период до модернизации ТЭЦ и на 53–76% по сравнению с показателем при повышении мощности без модернизации. Кроме того, отмечается

статистически значимая ($p < 0,001$) отрицательная динамика показателей суточной смертности от БСК, БОД, острых форм БСК, суточной обращаемости за медицинской помощью по поводу БСК, суточной обращаемости по поводу бронхиальной астмы — снижение на 38–77% (табл. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали результаты исследования, применение современных отечественных инженерно-технических

разработок как наилучших доступных технологий в рамках программы модернизации многотопливных ТЭЦ позволяет существенно увеличить мощность ТЭЦ при значительном снижении рисков здоровью населения, проживающего в зоне влияния атмосферных выбросов предприятий теплоэнергетики. В исследовании впервые дана оценка риску здоровью населения при внедрении НТВ-технологии сжигания твёрдого и газообразного топлива, а также при совместной работе паросилового и парогазового энергоблоков в составе многотопливной ТЭЦ. Полученные результаты согласуются с данными отечественных и зарубежных исследований, применяющих методологию оценки риска для сравнительного анализа вреда здоровью населения предприятий теплоэнергетики в зависимости от структуры топливного баланса и модернизации оборудования [1, 2, 10, 11]. Результаты исследований, выполненных в Москве, Воронеже, Великом Новгороде, Вельске и Нижнем Новгороде, доказали, что уменьшение доли твёрдого топлива в структуре топливного баланса ТЭЦ, модернизация топочных систем котлоагрегатов и систем пылегазоочистки способствуют значительному снижению риска смертности и заболеваемости БОД, а также канцерогенного риска у населения, проживающего в зоне влияния выбросов предприятий теплоэнергетики [1]. За рубежом, в странах ЕС, в составе проекта ExternE был выполнен комплекс исследований по оценке медико-экологических и экономических последствий эксплуатации теплоэлектростанций, работающих на твёрдом и газообразном топливе. Согласно результатам данного проекта, основной вклад в экономический ущерб вносят смертность населения, а также обращения и госпитализации по поводу БОД в результате воздействия выбросов твёрдотопливных электростанций. Экономический ущерб, связанный с дополнительными случаями смерти и заболеваний, в 3–4 раза выше по сравнению с аналогичным показателем для электростанций, работающих на природном газе. Подчеркивается приоритетная роль мелкодисперсных фракций летучей золы в формировании рисков здоровью населения, проживающего в зоне влияния атмосферных выбросов электростанций, работающих на твёрдом топливе [3, 7, 12].

Как показали испытания котла БКЗ-210 после реконструкции, выбросы оксидов азота при работе на торфе сократились на 21,43%, при работе на каменном угле (кузнецкий уголь марки Д) — на 70,0% и при использовании в качестве топлива природного газа — на 66,22%. В среднем отмечается сокращение выбросов оксидов азота на 52,55%. При совместном сжигании угля и природного газа, а также одного твёрдого топлива применение НТВ-типа сжигания способствовало снижению содержания несгоревших частиц угольного вещества в составе выбросов котла (доли горючих в уносе) в среднем на 46,94%, что значительно сокращает эмиссию углерода в окружающую среду. Увеличение тонины помола

угольной и торфяной пыли способствовало уменьшению доли частиц летучей золы диаметром менее 50 мкм на 18–20%. При переходе на НТВ-тип сжигания отмечается существенный прирост максимальной паропроизводительности и КПД котла при сжигании как твёрдого, так и газообразного топлива, что приводит к уменьшению удельного расхода топлива и снижению эмиссии загрязнителей в атмосферу [13]. Запуск в эксплуатацию парогазовой установки на ТЭЦ-3 позволил увеличить продукцию электрической энергии на 72,23%, тепловой — на 4,89% при значительном сокращении удельных расходов топлива и выбросов в атмосферу [2, 14]. Снижение количества выбросов в атмосферу достигается за счёт сокращения эмиссии твёрдых частиц на 50–70%, диоксида серы — на 47,5–62,0%, оксида углерода — на 68–80% и оксидов азота — на 3–38%. Основным источником загрязнения атмосферного воздуха является многотопливный паросиловой блок ТЭЦ, особенно при высоких значениях доли твёрдого топлива в топливном балансе.

При использовании НТВ-технологии сжигания твёрдого и газообразного топлива снижение уровня риска здоровью населения обусловлено уменьшением массы твёрдых частиц и оксидов азота в составе атмосферных выбросов многотопливной ТЭЦ, а также сокращением эмиссии в атмосферу в целом за счёт повышения КПД котлоагрегата и снижения удельных расходов на производство электрической и тепловой энергии. Для варианта модернизации ТЭЦ с совместной работой паросилового (старого) и парогазового (нового) энергоблоков снижение уровня риска здоровью населения обусловлено экономичностью и экологичностью работы ПГУ — высоким КПД, относительно небольшими удельными расходами на выработку электрической и тепловой энергии при значительном сокращении выбросов в атмосферу вредных химических веществ и твёрдых частиц [13, 14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение для модернизации многотопливных ТЭЦ наилучших доступных технологий, включающих современные отечественные инженерно-технические разработки, позволяет при увеличении выработки электрической и тепловой энергии значительно снизить уровень риска здоровью населения, сохранив преимущество использования как твёрдого, так и газообразного топлива.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ / ADDITIONAL INFORMATION

Вклад авторов: С.Б. Петров внёс существенный вклад в концепцию и дизайн исследования, получение, анализ и интерпретацию данных, подготовил первый вариант статьи; Ю.В. Жернов внёс существенный вклад в концепцию и дизайн исследования, участвовал в анализе данных, окончательно утвердил присланную в редакцию рукопись. Оба автора подтверждают

соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (оба автора внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Authors' contribution. S.B. Petrov made a significant contribution to the concept and design of the study, obtaining, analyzing and interpreting data, prepared the first version of the article; Yu.V. Zhernov made a significant contribution to the concept and design of the study, participated in data analysis, finally approved the manuscript sent to the editorial office. Both authors confirm that their

authorship meets the international ICMJE criteria (both authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Финансирование исследования. Собственные средства.

Research funding. No external sources of funding.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Competing interests. Authors declare the absence of any conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авалиани С.Л., Буштуева К.А., Голуб А.А. Медико-демографическая оценка выгод от снижения выбросов парниковых газов. В кн.: Изменение климата и здоровье населения России в XXI веке: сб. матер. междунар. семинара; 2004 Апрель 5–6; Москва: Издательское товарищество «АдамантЪ»; 2004. С. 185–294.
2. Ревич Б.А. К оценке влияния деятельности ТЭК на качество окружающей среды и здоровье населения // Проблемы прогнозирования. 2010. № 4. С. 87–99.
3. Петров С.Б. Медико-экологическая оценка района размещения предприятий теплоэнергетики // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2008. Т. 1. С. 209.
4. Куликов М.А., Гаврилов Е.И., Демин В.Ф., Захарченко И.Е. Риск воздействия атмосферных выбросов электростанций на здоровье населения // Теплоэнергетика. 2009. № 1. С. 71–76.
5. Ракитский В.Н., Кузьмин С.В., Авалиани С.Л., и др. Современные вызовы и пути совершенствования оценки и управления рисками здоровью населения // Анализ риска здоровью. 2020. № 3. С. 23–29. doi: 10.21668/health.risk/2020.3.03
6. Резинских В.Ф., Гринь Е.А. Надежность и безопасность ТЭС России на современном этапе: проблемы и перспективные задачи // Теплоэнергетика. 2010. № 1. С. 2–8.
7. Brunekreef B., Holgate S.T. Air pollution and health // *Lancet*. 2002. Vol. 360, N 9341. P. 1233–1242. doi: 10.1016/S0140-6736(02)11274-8
8. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021.
9. Халафян А.А. Современные статистические методы медицинских исследований. Москва: Издательство ЛКИ, 2008. 320 с.
10. Friedrich R., Rabl A., Spadaro J.V. Quantifying the costs of air pollution: the ExternE project of the EC // *Pollution Atmosphérique*. 2001. P. 77–104.
11. Zhu Q., Luo X., Zhang B., et al. Mathematical modeling, validation, and operation optimization of an industrial complex steam turbine network—methodology and application // *Energy*. 2016. Vol. 97, N C. P. 191–213. doi: 10.1016/j.energy.2015.12.112
12. Peng R.D., Bell M.L., Geyh A.S., et al. Emergency admissions for cardiovascular and respiratory diseases and the chemical composition of fine particle air pollution // *Environ Health Perspect*. 2009. Vol. 117, N 6. P. 957–963.
13. Григорьев К.А., Скудицкий В.Е., Зыкин Ю.В. Опыт низкотемпературного вихревого сжигания различных видов топлива в котле БКЗ-210-13,8 Кировской ТЭЦ // *Электрические станции*. 2010. № 4. С. 9–13.
14. Аминов Р.З., Гариевский М.В. Эффективность работы парогазовых ТЭЦ при переменных электрических нагрузках с учетом износа оборудования // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018. Т. 20, № 7–8. С. 10–22.

REFERENCES

1. Avaliani SL, Bushtueva KA, Golub AA. Mediko-demograficheskaja ocenka vygod ot snizhenija vybrosov parnikovovyh gazov. In: *Izmenenie klimata i zdorov'e naselenija Rossii v XXI veke: sb. mater. mezhdunar. seminara*; 2004 Apr 5–6; Moscow: Izdatel'skoe tovarishchestvo "Adamant"; 2004. P. 185–194. (In Russ).
2. Revich BA. Assessment of the effect produced by the fuel and energy complex on the environment and health. *Studies on Russian Economic Development*. 2010;21(4):403–410. (In Russ).
3. Petrov SB. Mediko-jekologicheskaja ocenka rajona razmeshhenija predpriyatij teploenergetiki. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2008;1:209. (In Russ).
4. Kulikov MA, Gavrilov EI, Demin VF, Zakharchenko IE. Risks relating to the effect of atmospheric emissions from thermal power stations on health of the population. *Thermal Engineering*. 2009;(56)1:78–85. (In Russ).
5. Rakitskii VN, Kuz'min SV, Avaliani SL, et al. Contemporary challenges and ways to improve health risk assessment and management. *Health Risk Analysis*. 2020;(3):22–28. (In Russ). doi: 10.21668/health.risk/2020.3.03
6. Rezinskih VF, Grin' EA. Nadezhnost' i bezopasnost' TJeS Rossii na sovremennom jetape: problemy i perspektivnye zadachi. *Teploenergetika*. 2010;(1):2–9. (In Russ).
7. Brunekreef B, Holgate ST. Air pollution and health. *Lancet*. 2002;360(9341):1233–1242. doi: 10.1016/S0140-6736(02)11274-8
8. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021.
9. Halafjan AA. *Sovremennye statisticheskie metody medicinskih issledovanij*. Moscow: Izdatel'stvo LKI; 2008. 320 p. (In Russ).
10. Friedrich R, Rabl A, Spadaro JV. Quantifying the costs of air pollution: the ExternE project of the EC. *Pollution Atmosphérique*. 2001;77–104.

11. Zhu Q, Luo X, Zhang B, Chen Y, et al. Mathematical modeling, validation, and operation optimization of an industrial complex steam turbine network—methodology and application. *Energy*. 2016;97(C):191–213. doi: 10.1016/j.energy.2015.12.112
12. Peng RD, Bell ML, Geyh AS, et al. Emergency admissions for cardiovascular and respiratory diseases and the chemical composition of fine particle air pollution. *Environ Health Perspect*. 2009;117(6):957–963.
13. Grigoriev KA, Skuditsky VE, Zykin YV. Application of low-temperature vortical combustion of different fuels in the steam-boiler BKZ-210-13,8 at Kirov CHP-4. *Power Technology and Engineering*. 2010;(4):9–13. (In Russ).
14. Aminov RZ, Gariievsky MV. The efficiency of combined-cycle CHP plant with variable electric loads, taking into account the wear and tear of equipment. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology* 2018;(7-8):10–22. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

***Петров Сергей Борисович**, к.м.н., доцент;
адрес: Россия, 610998, Киров, ул. К. Маркса, 112;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2592-4432>;
eLibrary SPIN: 4437-0407;
e-mail: sbpetrov@mail.ru

Жернов Юрий Владимирович, д.м.н., доцент, профессор;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8734-5527>;
eLibrary SPIN: 4538-9397;
e-mail: zhernov@list.ru

AUTHORS INFO

***Sergey B. Petrov**, MD, Cand. Sci. (Med.), associate professor;
address: 112 K. Marksa street, 610998, Kirov, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2592-4432>;
eLibrary SPIN: 4437-0407;
e-mail: sbpetrov@mail.ru

Yury V. Zhernov, MD, Dr. Sci. (Med.), professor;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8734-5527>;
eLibrary SPIN: 4538-9397;
e-mail: zhernov@list.ru

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author