

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА В АРКТИКЕ

Н. В. Павлов¹, В. Е. Захаров¹, Д. В. Прохоров¹, А. Е. Иванова¹, Т. Н. Петрова¹,
С. С. Васильев¹, И. Ю. Иванова², Е. П. Майсюк²

¹ Институт физико-технических проблем Севера имени В. П. Ларионова
Сибирского отделения РАН (Якутск, Российская Федерация)

² Институт систем энергетики имени Л. А. Мелентьева Сибирского отделения РАН (Иркутск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 31 января 2023 г.

Для цитирования

Павлов Н. В., Захаров В. Е., Прохоров Д. В. и др. Оценка экологической и энергетической безопасности вариантов развития теплоснабжения населенного пункта в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 3. — С. 417—427. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-417-427.

Представлены описание методов исследования и результаты оценки эколого-энергетической безопасности альтернативных вариантов теплоснабжения в сельской местности Арктической зоны Российской Федерации: централизованного от новой котельной на угле и индивидуального от автоматизированных котлов на древесных пеллетах. Получены экологические оценки вариантов теплоснабжения, при этом наиболее экологически благоприятным оказался вариант с использованием пеллет. Анализ угроз энергетической безопасности при реализации альтернативных вариантов теплоснабжения показал, что существенным ограничением экологически благоприятного варианта является необоснованность запасов древесины для производства пеллет на месте потребления.

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение, котельная на угле, индивидуальные котлы, древесные пеллеты, загрязняющие вещества, экологические оценки, энергетическая безопасность.

Введение

Одной из основных проблем развития арктических территорий России является обеспечение комфортных условий проживания населения в суровых климатических условиях [1]. Централизованное теплоснабжение в населенных пунктах удаленных труднодоступных территорий Республики Саха (Якутия) организовано в основном для социальных объектов [2]. Жилой сектор чаще всего отапливается от индивидуальных печей. Котельные, как правило, оборудованы котлами малой мощности, которые рассчитаны на сжигание сортированного и обогащенного угля. Однако в настоящее время все сжигаемые угли используются без какой-либо очистки,

обогащения, в процессе доставки подлежат неоднократным перегрузкам, перевалкам и длительному хранению. При эксплуатации котлов на рядовых углях увеличиваются слой загрязнений на поверхностях нагрева, растут трудозатраты на обслуживание котельных, значительно снижается их КПД. Поставка низкосортного топлива, эксплуатация котлов на недостаточно высоком уровне приводит к низкой эффективности использования и ежегодному перерасходу топлива. Объем этого перерасхода по разным оценкам достигает 22—28% объема топлива, расходуемого котельными республики.

Таким образом, существует необходимость в пересмотре сложившихся схем топливоснабжения и диверсификации производства тепловой энергии. Климатические особенности Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) требуют повышенной

надежности и работоспособности инженерных систем жизнедеятельности населенных пунктов.

Возможны разные варианты решения проблемы повышения эффективности систем теплоснабжения с использованием альтернативных видов топлива [3—5] и экологически благоприятных топлив [6]. В настоящее время большое внимание уделяется вопросам газификации угля и внедрению в АЗРФ установок с получением синтез-газа [7]. Такие проекты находятся в стадии обоснования и принятия решений на государственном уровне.

В данном исследовании рассматриваются только два варианта теплоснабжения из множества возможных:

- централизованное от механизированной котельной, работающей на рядовом угле;
- индивидуальное на основе автоматизированных пеллетных котлов.

Объектом исследования является арктическое поселение — село Хайысардах Верхоянского района Республики Саха (Якутия).

Целью исследования является оценка экологической и энергетической безопасности двух перспективных вариантов теплоснабжения данного населенного пункта. Экологическая безопасность оценивается по величине поступления загрязняющих веществ и диоксида углерода в атмосферу. Оценка энергетической безопасности выполняется с позиций обеспеченности ресурсами и учета угроз эксплуатации на основе различных видов топлива.

Несмотря на скудные запасы леса в АЗРФ, во многих населенных пунктах для отопления широко используются дрова. Особый интерес представляют ресурсы древесины, из которых можно изготовить древесные пеллеты. Для их производства не требуется высококачественный лес.

Организация теплоснабжения на основе такого возобновляемого источника энергии, как древесина, положительно влияет на экологическое состояние населенного пункта. Организованная заготовка древесного топлива позволит обеспечить контроль за вырубкой леса, соблюдение норм и правил проведения лесозаготовительных работ, что благоприятно скажется на восстановлении и обеспечении пожаробезопасности леса. С учетом существующих исследований по устойчивому развитию российской Арктики вполне возможен подход социальных инвестиций недропользователей [8] в части использования и такого ресурса, как древесина.

Характеристика объекта исследования

Исследования экологической и энергетической безопасности вариантов теплоснабжения проводятся на примере села Хайысардах, административного центра муниципального образования Эльгесский наслег. Село находится на правом берегу реки Яны на расстоянии 58 км (по автозимнику) к северу от поселка Батагай, административного центра Верхоянского улуса Республики Саха (Якутия). Климат

субарктический, резко континентальный. Температура января до -48°C , июля до $+17^{\circ}\text{C}$. Численность населения — 363 человека. Электроснабжение села обеспечивает автономная дизельная электростанция мощностью 560 кВт.

В настоящее время централизованное теплоснабжение в селе Хайысардах организовано от котельной «Центральная» Верхоянского филиала ГУП «ЖКХ Республики Саха (Якутия)», которая обеспечивает тепловой энергией социальные объекты: школу, пожарную емкость, клуб, дом духовности, администрацию, пришкольный интернат, баню [9]. В котельной установлены два котла «Энергия 3М» и один котел типа КВр-0,4. Суммарная установленная мощность составляет 1,25 Гкал/ч, КПД — 70%. Золоулавливающее оборудование отсутствует. В качестве топлива используется джебарики-хайский каменный уголь. Подача топлива ручная. Схема теплоснабжения — традиционная открытая. Тип прокладки трубопроводов — надземный с изоляцией трубопроводов минеральной ватой.

Кроме того, в селе эксплуатируется несколько мелких котельных на дровах, снабжающих теплом небольшие социальные объекты. Теплоснабжение населения обеспечивается за счет индивидуальных печей, в которых используются также дрова.

Суммарное теплотребление села оценивается в 6,7 тыс. Гкал, из которых 4,4 тыс. Гкал идет на отопление жилищного фонда, а 2,3 тыс. Гкал — объектов социального значения. Общая площадь отапливаемых помещений — 6200 м². Существенный рост потребления тепловой энергии в ближайшие годы не планируется. Суммарный расход топлива составляет 600 т угля и 8500 м³ дров в год [7]. Расход дизельного топлива на дизельной электростанции (ДЭС) оценивается в 183 т/год. Собственные нужды в тепловой энергии ДЭС обеспечиваются за счет утилизации тепла уходящих газов.

Методы исследования

Для экологической оценки вариантов теплоснабжения используются методики определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива и методические письма к ним^{1,2,3}. В расчетах участвуют справочные данные методическо-

¹ Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. — М.: Гос. комитет по охране окружающей среды Российской Федерации (при участии фирмы «Интеграл», Санкт-Петербург), 1999. — 53 с.

² Методическое письмо НИИ Атмосфера «О проведении расчетов выбросов вредных веществ в атмосферу по “Методике определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час” (М., 1999)» от 17 мая 2000 г. № 335/33-07. — СПб.: НИИ Атмосфера, 2000. — 20 с.

³ Письмо НИИ Атмосфера от 11 сентября 2001 г. № 838/33-07.

Таблица 1. Расчетный выброс загрязняющих веществ в атмосферу по основным ингредиентам от существующих энергоисточников, т/год**Table 1. Estimated emission of pollutants into the atmosphere by main ingredients from existing energy sources, t/year**

Вид топлива	Расход топлива, т/год	Твердые вещества	Диоксид серы	Оксиды азота	Оксид углерода	Всего
Уголь Джебарики-Хая (центральная котельная)	600	76,7	2,9	2,8	24,8	102,7
Дрова (котельные социальных объектов)	930	7,2	—	1,5	14,0	22,7
Дрова (домовые печи)	4176	54,8	—	13,2	41,0	109
Дизельное топливо (ДЭС)	183	0,4	0,9	7,3	4,8	15,7 *
<i>Итого</i>	—	139,1	3,8	24,8	84,6	254,6

* Суммарный выброс от ДЭС рассчитан с учетом углеводородов и формальдегида.

го пособия по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух [10]. Топочные характеристики для слоевых котлов приняты в соответствии с рекомендациями методик^{4,5} и данных о характеристиках котельных установок, а также с учетом особенностей сжигания древесного топлива в домашних печах [11; 12]. Выбросы загрязняющих веществ от эксплуатации дизельной электростанции рассчитаны на основе соответствующей методики⁶.

В качестве дополнительных экологических показателей рассчитана эмиссия диоксида углерода как основного из парниковых газов при сжигании органического топлива. Расчеты проводились в соответствии с методическими указаниями и руководством для количественной оценки выбросов парниковых газов от энергетических предприятий в Российской Федерации, утвержденными приказом Минприроды России⁷.

Методический подход к оценке энергетической безопасности основывается на сочетании логических методов оценки: сценарного метода, метода экспертных оценок (расстановки приоритетов) и др. [13—16]. Сравнение предпочтительности по энергетической безопасности вариантов теплоснабжения

⁴ Котлы КВр 0,4. — URL: <https://www.kotel-m.ru/boilers-kvr-04.html>.

⁵ Котел 300 кВт на дровах. — URL: <https://kotel-kvr.su/300kvt-boiler-wood-firewood.html>.

⁶ Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных дизельных установок. — СПб., 2001. — 18 с.

⁷ Методические указания и руководство по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации. — Утв. приказом Минприроды России от 30 июня 2015 г. № 300. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293756/4293756452.htm>.

населенного пункта выполнено по характерным для региона показателям-индикаторам, обоснованным в [13; 14], и состоит из следующих этапов:

- определение факторов, влияющих на надежность функционирования технологических основ, и сравнительная оценка степени их влияния;
- определение максимально возможных затрат при реализации тех или иных угроз;
- сравнение живучести технологических основ;
- анализ соотношения факторов, влияющих на рост себестоимости тепловой энергии;
- анализ обеспеченности топливно-энергетическими ресурсами.

Результаты исследования

Существующая схема теплоснабжения

При энергоснабжении села Хайысардах по существующей схеме суммарный выброс загрязняющих веществ в атмосферу от всех энергоисточников оценивается в 254,6 т/год (табл. 1). Наибольшие выбросы поступают от домашних печей и угольной котельной.

Эмиссия CO₂ в атмосферу при сжигании угля и дизельного топлива оценивается в 1530,4 т. При сжигании древесного топлива в соответствии с методическими указаниями приказа Минприроды № 300 от 30 июня 2015 г.⁸ с учетом методологии Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) эмиссия диоксида углерода принята отсутствующей.

Централизованное теплоснабжение от новой котельной на угле

Централизованное теплоснабжение села Хайысардах предусматривается от новой механизированной угольной котельной мощностью 6 МВт. Не-

⁸ Методические указания и руководство...

Таблица 2. Технико-экономические показатели новой централизованной механизированной котельной
Table 2. Technical and economic indicators of the new centralized mechanized boiler house

Показатель	Значение
Протяженность тепловых сетей, км	8,7
Выработка тепловой энергии, тыс. Гкал	10,5
Потери в сетях, тыс. Гкал	3,4
Полезный отпуск, тыс. Гкал	6,7
Потребление угля, т	3258
Потребление электроэнергии НН (0,4 кВ и ниже), тыс. кВт·ч	317
Цена угля у поставщика, руб./т	2356,7
Цена угля с учетом транспортировки и хранения, руб./т	23120,7
Численность работников	20

Таблица 3. Расчетный выброс загрязняющих веществ в атмосферу в варианте централизованного теплоснабжения, т/год

Table 3. Estimated emission of pollutants into the atmosphere in the district heating option, t/year

Вид топлива	Расход топлива, т/год	Твердые вещества	Диоксид серы	Оксиды азота	Оксид углерода
Уголь Джебарики-Хая	3258	59,1	17,6	16,6	68,0
Дизельное топливо	285	0,6	1,4	11,4	7,4

Примечание. Суммарный выброс от ДЭС рассчитан с учетом углеводородов и формальдегида.

обходимая выработка тепловой энергии составит 10,5 тыс. Гкал в год. Доля потерь от отпуска тепловой энергии при транспортировке оценивается в 33,7%. В табл. 2 представлены основные технико-экономические показатели новой котельной села Хайысардах.

Расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферу выполнен исходя из расчетного расхода топлива в котельной (см. табл. 2) с учетом данных о технических характеристиках котельных установок типа КВМ-2.0 с механической топкой с ленточной колосниковой решеткой типа ТЛПХ^{9,10,11}.

При отсутствии очистки дымовых газов на новой котельной выброс загрязняющих веществ в атмосферу увеличится вдвое по сравнению с существующим уровнем (с 254,6 до 495,8 т/год с учетом роста выбросов от ДЭС). Однако эксплуатация такой достаточно крупной угольной котельной без очистного оборудования не допускается, а в условиях современного экологического законодательства подобные котельные установки должны быть оснащены

золоулавливающим оборудованием. В настоящем исследовании подразумевается комплектация котлов оборудованием очистки дымовых газов (золоуловителями ЗУ-2,5 либо циклонами ЦН/БЦ/ЦБ-16) со степенью золоулавливания не ниже 85%. В этом случае выброс загрязняющих веществ в атмосферу (преимущественно твердых частиц) от новой котельной будет существенно снижен и оценивается в 161,3 т/год. Выбросы от ДЭС в данном случае рассчитаны с учетом роста потребности в электрической энергии на производственные нужды котельной и оцениваются в 24,4 т/год. С учетом выбросов ДЭС суммарный выброс загрязняющих веществ в атмосферу составит 185,7 т/год, что в 1,4 раза ниже, чем при существующей системе теплоснабжения (табл. 3).

При этом в 4,7 раза возрастет эмиссия диоксида углерода по сравнению с существующей системой теплоснабжения, которая оценивается в 7242,5 т/год.

С позиций энергетической безопасности централизованное отопление имеет ряд негативных сторон:

- низкая живучесть системы, обусловленная наличием единственного источника тепловой энергии и единственной трубопроводной системы ее рас-

⁹ <https://kvantrf.ru/vodogrejnnye-kotly-serii-kvm>.

¹⁰ <https://www.kvzr.ru/boiler-kvm-20-tlph.html>.

¹¹ <https://www.kvzr.ru/boiler-kvm-20-tlph.html>.

Таблица 4. Расчетный выброс загрязняющих веществ в атмосферу в варианте индивидуального теплоснабжения, т/год**Table 4. Estimated emission of pollutants into the atmosphere in the individual heat supply variant, t/year**

Вид топлива	Расход топлива, т/год	Твердые вещества	Диоксид серы	Оксиды азота	Оксид углерода
Пеллеты	1984,0	22,2	—	8,2	32,1
Дизельное топливо	279,3	0,6	1,4	11,2	7,3

Примечание. Суммарный выброс от ДЭС рассчитан с учетом углеводородов и формальдегида.

пределения, требующей резервирования и значительных финансово-материальных ресурсов для покрытия возможного ущерба от рисков аварийных ситуаций;

- потери тепловой энергии при ее распределении;
- необходимость организации системы учета потребления тепловой энергии у каждого абонента вследствие отсутствия ее в настоящее время;
- высокая материалоемкость.

Указанных негативных сторон лишены системы отопления на базе индивидуальных отопительных котлов. Индивидуальное отопление имеет ряд значительных преимуществ:

- высокая живучесть системы теплоснабжения в целом по населенному пункту;
- отсутствие теплотрасс, формирующих препятствия передвижению;
- сокращение потерь тепловой энергии;
- отсутствие необходимости организации учета тепловой энергии.

Индивидуальное теплоснабжение от автоматизированных пеллетных котлов

Для реализации индивидуального теплоснабжения на основе автоматизированных пеллетных котлов предполагается строительство завода производительностью до 5000 т пеллет в год на территории села Хайысардах. На завод будет поставляться преимущественно древесина лиственницы, произрастающей в Верхоянском районе на расстоянии не менее 40 км от населенного пункта. Пеллеты можно хранить в холодном крытом складе, откуда по мере необходимости грузовым автомобилем развозить по жилому сектору, инфраструктурным и муниципальным объектам внутри поселка.

Предполагается установка в каждом жилом доме и социальном объекте автоматизированного пеллетного котла. Его мощность подбирается индивидуально в зависимости от площади отапливаемого помещения. Обслуживать котлы (включая загрузку пеллет в бункер) будут специалисты сервисного центра.

Потребность в пеллетах для отопления жилого фонда и социальных объектов села Хайысардах рассчитывается исходя из потребности в тепловой энергии с учетом теплотворной способности пел-

лет и КПД автоматизированных котлов. Поскольку сырьем для изготовления пеллет должны стать ослабленные, рассыхающиеся и мертвые древостои вместе с корой и ветками, принято, что низшая теплотворная способность пеллет составит не более 3750 ккал/кг (согласно единой европейской сертификации древесных гранул, которая соответствует стандарту ENplus-A2) [12]. КПД автоматизированных пеллетных котлов составляет 90%. Соответственно потребность в пеллетах оценивается в 2000 т/год. Для производства этого количества пеллет требуется около 4300 м³ исходного сырья (биомассы).

Размер выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании пеллет определяется исходя из расчетного расхода топлива в этом варианте с учетом характеристик пеллет категории ENplus-A2 [12; 17].

При расчете выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от ДЭС в этом варианте учтено увеличение расхода дизельного топлива на 96,3 т/год по сравнению с существующим уровнем выработки электроэнергии для производственных нужд пеллетного завода. Вследствие этого выбросы в атмосферу от дизельной электростанции возрастут до 23,9 т/год (табл. 4).

Суммарный выброс загрязняющих веществ в варианте индивидуального теплоснабжения оценивается в 86,4 т/год, что значительно ниже выбросов при существующей системе теплоснабжения. Эмиссия диоксида углерода в этом варианте оценивается в 418 т за счет сжигания дизельного топлива на ДЭС.

Обсуждение результатов исследования

Экологическая безопасность

При реализации варианта централизованного теплоснабжения от угольной котельной выброс загрязняющих веществ в атмосферу выше практически в 2,1 раза (на 99,3 т/год) по сравнению с вариантом индивидуального теплоснабжения от автоматизированных пеллетных котлов. В то же время вариант централизованного теплоснабжения от котельной на угле за счет установки золоулавливающего оборудования позволит снизить выбросы в 1,4 раза (на 69 т/год) по сравнению с существующим состоянием.

Таблица 5. Сравнение экологических показателей альтернативных вариантов теплоснабжения с существующим состоянием

Table 5. Comparison of environmental indicators of alternative heat supply options with the existing state

Вариант теплоснабжения	Изменения объемов топлива				Расчетные выбросы, т/год	
	Уголь, т/год	Дрова, м ³ /год	Дизельное топливо, т/год	Пеллеты, т/год	ЗВ *	CO ₂
Централизованное от новой котельной на угле	↑ на 2656,4	↓ на 8510	↑ на 102	—	↓ на 68,9	↑ на 5712,1
Индивидуальное от автоматизированных пеллетных котлов	↓ на 600	↓ на 4210	↑ на 96,3	↑ на 1984	↓ на 168,2	↓ на 1112,4

* ЗВ — загрязняющие вещества.

Экологические показатели альтернативных вариантов теплоснабжения села Хайысардах по сравнению с существующим состоянием на фоне изменения объемов расхода топлива приведены в табл. 5, а структура выбросов загрязняющих веществ по видам топлива представлена на рис. 1.

С точки зрения экологии вариант индивидуального теплоснабжения от автоматизированных пеллетных котлов наиболее привлекателен, поскольку позволит снизить выбросы загрязняющих веществ по сравнению с существующим состоянием энергоснабжения в 2,9 раза (на 168,2 т/год).

Реализация варианта централизованного теплоснабжения от новой угольной котельной увеличит эмиссию CO₂ в сравнении с существующим состоянием в 4,7 раза. Вариант индивидуального теплоснабжения от пеллетных котлов будет способствовать снижению существующей эмиссии с 1530,4 до 418 т/год.

Энергетическая безопасность

1. Оценка степени влияния факторов на надежность функционирования технологических основ.

Природно-климатические факторы. В варианте централизованного теплоснабжения от новой котельной на угле звено топливоснабжения содержит сложную многоэтапную схему доставки топлива по сезонным транспортным коридорам. Все транспортные участки имеют критическую зависимость от природно-климатических факторов.

Технологическая основа индивидуального теплоснабжения от автоматизированных пеллетных котлов в звене топливоснабжения имеет звено транспортировки заготовленного сырья до пеллетного завода. Транспортный коридор при этом представляет собой искусственный проход по бездорожью в зимний период.

Степень монополизации отдельных звеньев технологических основ. Технологическое оборудование всех звеньев обоих вариантов не является уни-

кальным. На отечественном рынке все виды оборудования представлены в достаточно широком ассортименте. Высокая монопольная зависимость имеется в технологической основе централизованного теплоснабжения на звене доставки угля водными путями, где на некоторых участках функционирует единственный поставщик услуг. Производственные процессы индивидуального теплоснабжения осуществляются без привлечения сторонних ресурсов.

2. Оценка максимально возможных затрат при реализации угроз различного рода.

Угрозы значительной потери технологического оборудования. К таким угрозам можно отнести утрату вследствие пожара, стихийных бедствий, террористического акта, военных действий и иных разрушающих воздействий объектов с высокой концентрацией технологического оборудования. В случае централизованного теплоснабжения к ним относится центральная котельная, при угрозе по отношению к которой потребуются перевод потребителей на резервные источники теплоснабжения, подготовка к разморозке объектов без резервного источника питания и тепловых сетей. В случае индивидуального теплоснабжения наиболее ценное оборудование сконцентрировано на пеллетном заводе, при потере которого и достаточном запасе топлива режим теплоснабжения потребителей не нарушается.

Угрозы потери запасов (недоставки) топлива. В случае централизованного теплоснабжения значительный дефицит топлива может возникнуть при нарушениях нормального функционирования транспортной инфраструктуры, поставщиков и иных угрозах, вызванных природно-климатическими, социально-экономическими, политическими факторами. Наиболее высокую вероятность имеют угрозы нарушения нормального функционирования транспортной инфраструктуры на водных участках. При этом нарушаются планы поставки угля для всего района.

В случае индивидуального теплоснабжения высокий риск потерь запасов топлива обусловлен

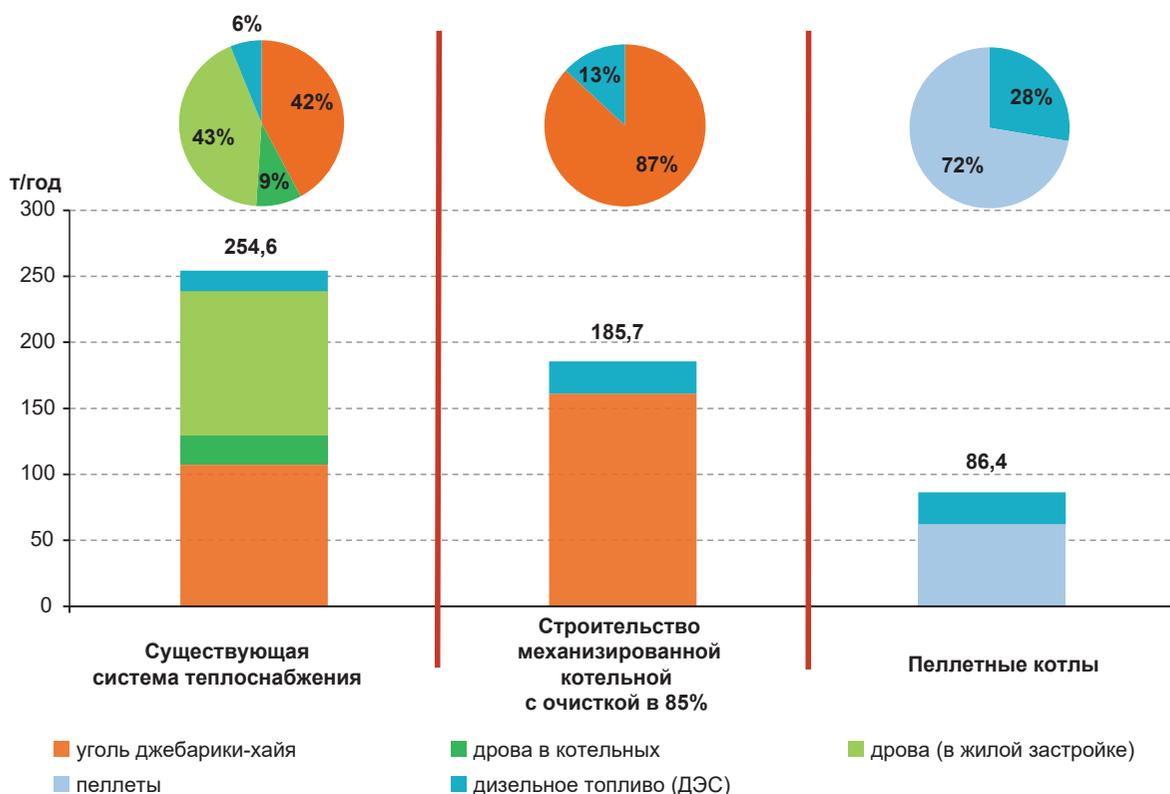


Рис. 1. Структура расчетных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при разных вариантах теплоснабжения по видам топлива

Fig. 1. The structure of calculated emissions of pollutants into the atmosphere for different heat supply options by fuel type

угрозой потери склада хранения пеллет вследствие пожара.

Угрозы длительного нарушения нормального режима теплоснабжения потребителей. Наиболее вероятное явление, способное повлечь за собой реализацию данной угрозы, — длительное нарушение электроснабжения. Материальный ущерб при этом пропорционален стоимости потребленного топлива резервными источниками до восстановления электроснабжения. При этом резервный источник централизованного варианта рассчитан на собственные нагрузки, а большинство резервных источников частных домовладений будут избыточны по мощности. В данном случае ущерб для обоих вариантов можно считать сопоставимым.

3. Сравнение живучести технологических ос нов каждого варианта. С этих позиций вариант индивидуального теплоснабжения, безусловно, выигрывает. Тем не менее централизованный вариант благодаря возможностям современных средств автоматики и контроля функционирования элементов системы, грамотному резервированию узких мест также может обеспечить достаточный уровень живучести. Для обеспечения одинакового уровня живучести централизованный вариант теплоснабжения требует вложения более значительных средств.

4. Обеспеченность топливно-энергетическими ресурсами. Основным потребляемым ресурсом

при централизованном теплоснабжении является уголь. Обеспеченность запасами угля на уровне региона и страны высокая. В долгосрочной перспективе угрозы дефицита угля не прогнозируются.

Основным потребляемым ресурсом при индивидуальном теплоснабжении является древесина. Запасы древесины на экономически доступном расстоянии от предлагаемого пеллетного завода в настоящее время не оценены с достаточной точностью. По результатам полевых замеров продуктивность леса составляет не более 50 м³/га. При допущении, что объем леса для заготовки пеллет для нужд села Хайысардах составит 4300 м³/год, нужно проводить выборочную рубку на площади не менее 86 га. По предварительным оценкам этой древесины достаточно на 18—20 лет. При этом длительно-постепенные рубки согласно лесохозяйственному регламенту Верхоянского лесничества должны проводиться с повторением через 30—40 лет. Это указывает на предпосылки возможного дефицита сырья для долгосрочной ориентации теплоснабжения села Хайысардах на пеллетное топливо.

Заклучение

Научная значимость исследования связана с обоснованием альтернативных вариантов теплоснабжения с экологической точки зрения и с позиций

оценки угроз энергетической безопасности без привлечения экономических оценок, которые играют существенную роль при принятии тех или иных решений и их практической реализации.

Исследование позволило получить следующие выводы:

1. Решение проблем сезонного завоза топлива из-за сложной и протяженной схемы доставки требуют поиска альтернативных вариантов теплоснабжения арктических населенных пунктов. Таким решением может стать индивидуальное отопление потребителей на основе автоматизированных котлов на древесных пеллетах местного производства.

2. Переход на индивидуальное отопление потребителей на основе древесных пеллет позволит получить на арктических территориях двойной эффект — как энергетический, так и экологический.

3. Сравнение альтернативных вариантов теплоснабжения — от централизованной угольной котельной и индивидуальных пеллетных котлов — показало, что разница в выбросах загрязняющих веществ в атмосферу составит 99,3 т/год, а в эмиссии диоксида углерода — 6824,5 т/год в пользу варианта индивидуального теплоснабжения.

4. По итогам анализа энергетической безопасности потребителей арктического поселения при централизованном и индивидуальном теплоснабжении выявлено, что по большинству показателей предпочтителен вариант индивидуального теплоснабжения. В то же время он имеет серьезные ограничения по запасам доступной для производства пеллет древесины. Перед принятием решения об ориентации потребителей арктических территорий на долгосрочной основе на древесные пеллеты местного производства необходимо детально изучить запасы древесины на перспективных лесосеках.

5. Древесные отходы не могут быть единственным видом топлива для производства тепловой энергии в селе. Для обеспечения потребности в тепловой энергии ежегодная площадь вырубки в среднем составит 200 га. Кроме того, работа спецтехники в лесах может способствовать механическому нарушению мохово-лишайникового, травяно-кустарничкового и кустарничкового ярусов; уплотнению, иссушению и сдуванию мелкозема; для тиксотропных почв — смыву; возможна постепенная смена видового состава травяного покрова и кустарничкового яруса. Поэтому вовлечение древесины в хозяйственный оборот, несомненно, требует масштабных лесовосстановительных работ. При этом проблему древесных отходов от санитарных рубок возможно решить путем создания собственного пеллетного производства.

Финансирование. Работа выполнена в рамках проектов государственного задания № FWEU-2021-0004 и № FWRS-2021-0014 программы фундаментальных исследований РФ на 2021—2025 гг.

с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13. ЦКП.21.003).

Литература/References

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. — Утв. указом Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645. — URL: <http://www.scrf.gov.ru/media/files/file/hcTiEHnCdn6TqRm5A677n5iE3yXLi93E.pdf>.

Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035. Approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 645, dated October 26, 2020. Available at: <http://www.scrf.gov.ru/media/files/file/hcTiEHnCdn6TqRm5A677n5iE3yXLi93E.pdf>. (In Russian).

2. Официальный сайт ГУП «Жилищно-коммунальное хозяйство Республики Саха (Якутия)». — URL: <https://jkhsakha.ru/static/filials>.

Official website of the State Unitary Enterprise “Housing and Communal Services of the Republic of Sakha (Yakutia)”. Available at: <https://jkhsakha.ru/static/filials>. (In Russian).

3. Saneev B. G., Ivanova I. Y., Shakirov V. A. Assessment of Indicators of Solar and Wind Energy Potential of the Republic of Sakha (Yakutia). *Geography and Natural Resources*, 2022, vol. 43, no. 1, pp. 74—79. DOI: 10.1134/S187537282205016X.

4. Шакиров В. А., Иванова И. Ю., Иванов Р. А. Оценка экономической целесообразности подключения удаленных потребителей восточной Арктики к энергосистеме // *Арктика: экология и экономика*. — 2022. — Т. 12, № 1. — С. 19—33. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-19-33.

Shakirov V. A., Ivanova I. Yu., Ivanov R. A. Economic feasibility assessment of connecting remote Eastern Arctic consumers to the power grid. *Arctic: Ecology and Economy*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 19—33. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-19-33. (In Russian).

5. Иванова И. Ю., Ноговицин Д. Д., Тугузова Т. Ф. и др. Анализ функционирования солнечных электростанций в децентрализованной зоне Республики Саха (Якутия) // *Альтернатив. энергетика и экология*. — 2018. — № 10—12. — С. 12—22. — DOI: 10.15518/isjaee.2018.10-12.012-022.

Ivanova I. Yu., Nogovitsin D. D., Tuguzova T. F., Sheina Z. M., Sergeeva L. P. Analysis of the functioning of solar power plants in the decentralized zone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Alternative energy and ecology*, 2018, no. 10—12, pp. 12—22. DOI: 10.15518/isjaee.2018.10-12.012-022. (In Russian).

6. Майсюк Е. П., Иванова И. Ю. Экологическая оценка использования разных видов топлива для производства энергии в арктических районах Дальнего Востока // *Арктика: экология и экономика*. — 2020. — № 1 (37). — С. 26—36. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-26-36.

- Maysyuk E. P., Ivanova I. Yu. Environmental assessment of different fuel types for energy production in the Arctic territories of the Far East. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 1 (37), pp. 26—36. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-26-36. (In Russian).
7. Даваахуу Н., Потравный И. М., Милославский В. Г., Уткин И. И. Обоснование и механизм реализации проекта газификации угля в российской Арктике // Уголь. — 2019. — № 9. — С. 88—93. — URL: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-9-88-93>.
- Davaakhuu N., Potravny I. M., Miloslavsky V. G., Utkin I. I. Rationale and mechanism for the implementation of the project of coal gasification in the Russian Arctic. *Ugol' — Russian Coal J.*, 2019, no. 9, pp. 88—93. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-9-88-93>. (In Russian).
8. Novoselov A., Potravny I., Novoselova I., Gassiy V. Social Investing Modeling for Sustainable Development of the Russian Arctic. *Sustainability*, 2022, 14, 933. Available at: <https://doi.org/10.3390/su14020933>.
9. Проект схемы теплоснабжения с. Хайысардах Эльгесского наслега Верхоянского улуса. — [S. I.]: ООО «Ремстройпроект», 2020. Draft heat supply scheme of the Khayysardakh settlement of the Elgessky community of the Verkhoyansk district. [S. I.], "Remstroyproekt" LLC, 2020. (In Russian).
10. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. — СПб., 2012. — 356 с. Guidelines for the calculation, standardization, and control of emissions of pollutants. St. Petersburg, 2012, 356 p. (In Russian).
11. Особенности сжигания дров в печи. — URL: <http://health.totalarch.com/bathhouse/5/7/2>. Specific features of burning wood in a stove. Available at: <http://health.totalarch.com/bathhouse/5/7/2>. (In Russian).
12. Актуальный стандарт EN Plus: требования к пеллетам и сырью. — URL: <https://albnn.com/production/articles/en-plyus/>.
- Current EN Plus standard: requirements for pellets and raw materials. Available at: <https://albnn.com/production/articles/en-plyus/>. (In Russian).
13. Бушуев В. В., Воронай Н. И., Мастепанов А. М. и др. Энергетическая безопасность России. — Новосибирск: Наука: Сибир. издат. фирма РАН, 1998. — 302 с.
- Bushuev V., Voropai N., Mastepanov A., Shafranik Yu. et al. Energy security of Russia. Novosibirsk, 1998, 302 p. (In Russian).
14. Пяткова Н. И. и др. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. — 198 с.
- Pyatkova N. I. et al. Energy Security of Russia: problems and solutions. Novosibirsk, 2011, 198 p. (In Russian).
15. Сендеров С. М., Рабчук В. И., Пяткова Н. И., Воробьев С. В. Обеспечение энергетической безопасности России: выбор приоритетов / Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева. — Новосибирск: Наука, 2017. — 116 с.
- Senderov S. M., Rabchuk V. I., Pyatkova N. I., Vorobyev S. V. Ensure energy security in Russia: choosing priorities. Melentyev Energy Systems Inst. Novosibirsk, Nauka publ., 2017, 116 p. (In Russian).
16. Борталевич С. И. Методические основы оценки энергетической безопасности регионов // Экон. анализ: теория и практика. — 2012. — № 38 (293). — С. 33—42.
- Bortalevich S. I. Methodological foundations for assessing the energy security of the regions. Economic analysis: theory and practice, 2012, no. 38 (293), pp. 33—42. (In Russian).
17. Visser L., Hoefnagels R., Junginger M. The Potential Contribution of Imported Biomass to Renewable Energy Targets in the EU — the Trade-off between Ambitious Greenhouse Gas Emission Reduction Targets and Cost Thresholds. *Energies*, 2020, vol. 13, p. 1761.

Информация об авторах

Павлов Никита Владимирович, заведующий отделом проблем энергетики, Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН (677980, Россия, Якутск, Октябрьская ул., д. 1), e-mail: pavlov_nv@iptpn.yasn.ru.

Захаров Василий Егорович, научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН (677980, Россия, Якутск, Октябрьская ул., д. 1), e-mail: vasss@mail.ru.

Прохоров Дмитрий Валерьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН (677980, Россия, Якутск, Октябрьская ул., д. 1), e-mail: prokhorovdv@gmail.com.

Иванова Альбина Егоровна, ведущий инженер, Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН (677980, Россия, Якутск, Октябрьская ул., д. 1), e-mail: aeiva@mail.ru.

Петрова Татьяна Николаевна, ведущий инженер, Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН (677980, Россия, Якутск, Октябрьская ул., д. 1), e-mail: tn_petrova_s@mail.ru.

Васильев Семен Семенович, ведущий инженер, Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН (677980, Россия, Якутск, Октябрьская ул., д. 1), e-mail: vasilievss_ykt@mail.ru.

Иванова Ирина Юрьевна, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130), e-mail: nord@isem.irk.ru.

Майсюк Елена Петровна, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130), e-mail: maysyuk@isem.irk.ru.

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL SAFETY AND ENERGY SECURITY FOR THE DEVELOPMENT OPTIONS OF HEAT SUPPLY TO A SETTLEMENT IN THE ARCTIC

Pavlov, N. V.¹, Zakharov, V. E.¹, Prokhorov, D. V.¹, Ivanova, A. E.¹, Petrova, T. N.¹, Vasiliev S. S.¹, Ivanova, I. Yu.², Maysyuk, E. P.²

¹ V. P. Laronov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS (Yakutsk, Russian Federation)

² Melentiev Energy Systems Institute, SB RAS (Irkutsk, Russian Federation)

The article was received on January 31, 2023

For citing

Pavlov N. V., Zakharov V. E., Prokhorov D. V., Ivanova A. E., Petrova T. N., Vasiliev S. S., Ivanova I. Yu., Maysyuk E. P. Assessment of environmental safety and energy security for the development options of heat supply to a settlement in the Arctic. Arctic: Ecology and Economy, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 417—427. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-417-427. (In Russian).

Abstract

The article presents the results of comparing the environmental performance of district and individual heating options on the example of a settlement located in the Arctic territory of the Republic of Sakha (Yakutia). The thermal energy source for the district option is a coal-fired boiler house; the one for the individual option is automated pellet boilers. The boiler house receives coal according to a complex multi-link scheme, whereas pellets are produced on site. The district heating option involves laying heat networks throughout the village because currently it has none. The individual heating option suggests the construction of a pellet production plant.

Environmental indicators are calculated emissions of pollutants and carbon dioxide emissions from fuel combustion. Pollutants include solids, sulfur dioxide, nitrogen oxides, and carbon monoxide. Along with environmental indicators, the authors consider the conditions for ensuring energy security in various heating options.

The research findings show the advantage of the individual heating option based on automated pellet boilers for environmental indicators. The risks for this option are assessed from the standpoint of threats to the energy security of the settlement in comparison with the district heating option. The factors considered as threats include

those affecting the reliability and survivability of process technologies, an increase in the thermal energy cost, and the availability of fuel and energy resources. The main limitation for the option of individual heating in the Arctic territories, which is based on locally produced wood pellets, is the lack of reasonable reserves of available wood in wood-cutting areas near the settlement.

Keywords. *District heating, coal-fired boiler, individual boilers, wood pellets, pollutants, environmental assessments, energy security.*

Funding. The work was carried out under the projects of State assignments No. FWEU-2021-0004 and No. FWRS-2021-0014 of the program of fundamental research of the Russian Federation for 2021—2025, using the resources of the Common Use Center “High-Temperature Circuit” (Ministry of Education and Science of Russia, project No. 13.CUC.21.003).

Information about the authors

Pavlov, Nikita Vladimirovich, Head of the Energy Problems Department, Larionov Institute of the Physical-technical Problems of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences (1, Oktyabrskaya St., Yakutsk, Russia, 677980), e-mail: pavlov_nv@iptpn.ysn.ru.

Zakharov, Vasiliy Egorovich, Researcher, Larionov Institute of the Physical-technical Problems of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences (1, Oktyabrskaya St., Yakutsk, Russia, 677980), e-mail: vasss@mail.ru.

Prokhorov, Dmitry Valerievich, PhD., Senior Researcher, Larionov Institute of the Physical-technical Problems of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences (1, Oktyabrskaya St., Yakutsk, Russia, 677980), e-mail: prokhorovdv@gmail.com.

Ivanova, Albina Egorovna, Leading Engineer, Larionov Institute of the Physical-technical Problems of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences (1, Oktyabrskaya St., Yakutsk, Russia, 677980), e-mail: aeiva@mail.ru.

Petrova, Tatyana Nikolaevna, Leading Engineer, Larionov Institute of the Physical-technical Problems of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences (1, Oktyabrskaya St., Yakutsk, Russia, 677980), e-mail: tn_petrova_s@mail.ru.

Vasiliev, Semen Semenovich, Leading Engineer, Larionov Institute of the Physical-technical Problems of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences (1, Oktyabrskaya St., Yakutsk, Russia, 677980), e-mail: vasilievss_ykt@mail.ru.

Ivanova, Irina Yurievna, Ph.D., Senior Researcher, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS (130, Lermontov St., Irkutsk, Russia, 664033), e-mail: nord@isem.irk.ru.

Maysyuk, Elena Petrovna, Ph.D., Senior Researcher, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS (130, Lermontov St., Irkutsk, Russia, 664033), e-mail: maysyuk@isem.irk.ru.