

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-273-281>  
УДК 620.92

## Улучшение экологической ситуации и безопасности мегаполиса путем модернизации энергопромышленного комплекса

Гашо Е. Г.<sup>1\*</sup>, Мартынов А. В.<sup>1</sup>, Кутъко Н. Е.<sup>1</sup>, Черханова О. А.<sup>1</sup>, Рудомазин В. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

ул. Красноказарменная, д.14, 111250, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ФГАУ «НИИ «ЦЭПП»

пер. Стремянный, д. 38, 115054, г. Москва, Россия

Поступила / Received 17.07.2020

Принята к печати / Accepted for publication 17.11.2020

Рассматриваются варианты модернизации энергопромышленного комплекса, включающего в себя большое количество предприятий и теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) с наличием низкопотенциального сбросного тепла. При модернизации предлагается использование тепловых насосов (ТНУ) в системах ТЭЦ. Представлен вариант использования низкопотенциального тепла незамерзающего в зимнее время Енисея. Произведены оценки экологической и экономической эффективности предлагаемых вариантов.

В качестве примера рассматривается город Красноярск, расположенный на обоих берегах Енисея. В Красноярске работают крупные ГЭС, которые по электроэнергии вырабатывают избыточную мощность. Также работают ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 и большое количество котельных, вредные выбросы которых подробно изложены в статье. Кроме этого, приводятся данные по количеству низкопотенциальных источников, рассматриваются варианты использования низкопотенциальных источников тепла в ТНУ. Представлен выход низкопотенциального тепла по месяцам, результаты расчета по сопоставлению вариантов использования ТНУ на трех ТЭЦ. Изучена возможность закрытия неэффективных котельных, работающих на угле, что позволит сократить вредные выбросы в атмосферу и уменьшить себестоимость производства тепла в мегаполисе для систем централизованного теплоснабжения.

Рассматривается работа Красноярского алюминиевого завода, который имеет вредные выбросы (фтор, оксиды серы, пыль, смолистые вещества), а также потери первичной энергии 13,5 млн. Гкал, из которых только 40% идет на производство алюминия, а 60% теряется и выбрасывается в окружающую среду. Для уменьшения этих потерь в 1,5 раза предлагается установить воздушные теплообменники. Перспектива использования ТНУ большой мощности обеспечивается наличием речной воды из Енисея, температура которой даже в зимние времена не опускается ниже 3°C. Мощные ТНУ с центробежными компрессорами, выпускаемыми в г. Казань, позволят обеспечить теплом строящиеся в Красноярске административные и жилые здания с суммарной тепловой нагрузкой 803 Гкал/ч. Срок окупаемости систем с ТНУ составляет 6÷8 лет.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Экологическая модернизация, сокращение вредных выбросов, ТНУ, ТЭЦ, вторичные энергоресурсы (ВЭР), утилизация тепла, теплоснабжение

### Адрес для переписки:

Гашо Е. Г.  
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», кафедра ПТС  
ул. Красноказарменная, д.14, 111250, г. Москва, Россия,  
e-mail: gashoyg@mpei.ru

### Для цитирования:

Гашо Е. Г., Мартынов А. В., Кутъко Н. Е., Черханова О. А., Рудомазин В. В. Улучшение экологической ситуации и безопасности мегаполиса путем модернизации энергопромышленного комплекса, включающего ТЭЦ. Надежность и безопасность энергетики. 2020. – Т. 13, №4. – С. 273 – 281.  
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-273-281>

### Address for correspondence:

Gasho E. G.  
National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Department IHES  
Krasnokazarmennaya str., 14, 111250, Moscow, Russia  
e-mail: gashoyg@mpei.ru

### For citation:

Gasho E. G., Martynov A. V., Kutko N. E., Cheranova O. A., Rudomin V. V. [Improving the environmental situation and safety of the megalopolis by modernizing the energy industry]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2020. vol. 13, no. 4 pp. 273 – 281. (in Russian)  
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-273-281>

# Improving the environmental situation and safety of the megalopolis by modernizing the energy industry

Gasho E. G.<sup>1\*</sup>, Martynov A. V.<sup>1</sup>, Kutko N. E.<sup>1</sup>, Cherkhanova O. A.<sup>1</sup>, Rudomazin V. V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Krasnokazarmennaya str., 14, 111250, Moscow, Russia

<sup>2</sup> HIGHER «Sri «cap»

per. Stremyanny, 38, 115054, Moscow, Russia

Options are considered for modernization of the energy industry complex, which includes a large number of enterprises and combined heat and power plants (CHPP) with low-potential waste heat. For modernization, it is proposed to use heat pumps (HPI) in CHPP systems. A variant is presented of using the low-potential heat of the ice-free Yenisei River. The environmental and economic efficiency of the proposed options have been evaluated.

The city of Krasnoyarsk located on both banks of the Yenisei River, is considered as an example. In Krasnoyarsk, there are large hydroelectric power plants that generate excess power for electricity. CHPP-1, CHPP-2 and CHPP-3 also operate, as well as a large number of boiler houses, whose harmful emissions are described in detail in the article. In addition, data on the number of low-potential sources are provided, and options for using low-potential heat sources in heat pump installations are considered. The output of low-potential heat by month is presented, and the calculation results are based on comparison of options for using HPI at three CHPPs. The possibility of closing inefficient coal-fired boilers has been examined, which would reduce harmful emissions into the atmosphere and reduce the cost of heat production in the megalopolis for district heating systems.

The operation of the Krasnoyarsk Aluminium Plant is considered, which has harmful emissions (fluorine, sulfur oxides, dust, resinous substances), as well as primary energy losses of 13.5 million Gcal, of which only 40% goes to aluminium production, and 60% is lost and released into the environment. To reduce these losses by 1.5 times, it is proposed to install air heat exchangers. The prospect of using high-capacity HPIs is provided by the presence of river water from the Yenisei, the temperature of which does not fall below 3°C even in winter. Powerful HPIs with centrifugal compressors manufactured in Kazan will provide heat to administrative and residential buildings under construction in Krasnoyarsk with a total heat load of 803 Gcal/h. The payback period of systems with HPI is 6÷8 years.

**KEYWORDS:** Environmental modernization, reduction of harmful emissions, HPI, CHPP, secondary energy resources (SER), heat recovery, heat supply

Экологическая обстановка многих промышленных городов, особенно мегаполисов в России, во многом зависит от методов производства энергии различных видов, таких, как электроэнергия, тепло, холод, а также от различных энергоносителей, таких, как пар, сжатый воздух и др.

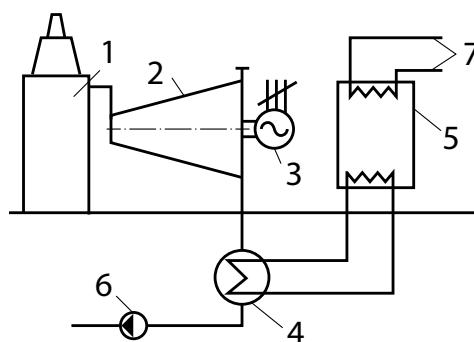
Ухудшение экологической обстановки во многом связано с наличием вторичных энергоресурсов (ВЭР), которые высвобождаются при производстве промышленных товаров на предприятиях. Большое количество ВЭР связано с наличием теплой воды, образующейся при охлаждении конденсаторов паровых турбин и холодильных установок, холодильников воздушных компрессоров, а также охлаждения различных печей и другого оборудования.

Большое количество теплой воды требует создания установок для ее охлаждения. Так, на ТЭЦ сооружаются градирни, которые, занимая большую территорию, приводят к ухудшению экологической обстановки в городах. При работе градирен охлаждаемая вода стекает сверху вниз, и при этом создаются большие выбросы мелкой дисперсной водяной пыли, которая распространяется вокруг на большие расстояния по всей прилегающей к градирне территории, а при наличии ветра водяная пыль распространяется далеко по всему городу.

Ликвидация градирен на ТЭЦ является одним из на-

правлений улучшения экологической обстановки городов. Так, в г. Иваново в процессе модернизации ТЭЦ в июле 2019 г. была произведена ликвидация градирни. Градирня весом в 5000 т при направленном взрыве мягко и медленно опустилась на землю [1].

На рисунке 1 представлена схема модернизирован-



**Рисунок 1.** Схема модернизации ТЭЦ (1 — котел, 2 — турбина, 3 — электрогенератор, 4 — конденсатор, 5 — тепловой насос (ТН), 6 — центробежный насос, 7 — система централизованного теплоснабжения

**Figure 1.** CHPP modernization diagram (1 — boiler, 2 — turbine, 3 — electric generator, 4 — condenser, 5 — heat pump (HP), 6 — centrifugal pump, 7 — district heating system

ной ТЭЦ без градирни. При ликвидации градирен, а их на ТЭЦ имеется несколько, высвобождается достаточно большая площадь, которая может быть использована для других целей, например, для городского строительства и строительства промышленных предприятий.

При модернизации ТЭЦ с ликвидацией градирни для охлаждения циркуляционной воды, подаваемой в конденсатор 4, необходимо предусмотреть любой трансформатор тепла (ТТ) с производством холода.

Это может быть парокомпрессионный или абсорбционный ТТ. Однако, наиболее подходящим вариантом при модернизации ТЭЦ является установка теплового насоса, который, кроме охлаждения циркуляционной воды, являющейся источником тепла ( $Q_{\text{НПИТ}}$ ), производит тепло ( $Q_{\text{TC}}$ ) для теплоснабжения потребителей.

Кроме ликвидации градирен, для улучшения экологической обстановки необходимо демонтировать дымовые трубы на ТЭЦ, из которых распространяются продукты горения. Так, на Красноярской ТЭЦ 26 марта 2020 г. была взорвана дымовая труба. Ликвидация дымовых труб позволит очистить воздух в мегаполисе от продуктов горения, которые распространяются из дымовых труб ТЭЦ, работающих на угле. При отсутствии дымовой трубы на энергоблоке будут установлены электрофильтры.

Красноярск — административный центр Красноярского края — расположен на обоих берегах Енисея на стыке Западносибирской равнины, Среднесибирского плоскогорья и Алтайско-Саянских гор, в котловине, образованной северными отрогами Восточного Саяна. Высота над уровнем моря — 145 метров (русло реки Енисей) (рисунок 2).

Красноярск находится в умеренном климатическом поясе, в середине Евразийского континента, вдали от океанов и морей. Наиболее часто сюда поступают массы континентального полярного воздуха, реже арктического. Воздух тропиков до этой широты доходит еще реже и преимущественно в теплое время года. Потому климат на территории города сухой и резко-

континентальный со значительными изменениями температуры дня и ночи, зимы и лета.

Население Красноярска оставляет около 1,1 млн. чел., а Красноярской агломерации — примерно 1,34 млн. Площадь города 354 км<sup>2</sup>, плотность населения — 2765 чел./км<sup>2</sup>. Градусо-сутки Красноярска — 6341, продолжительность отопительного периода — 234 сут. Город имеет развитую промышленность, порядка 56 промышленных предприятий функционируют и расположены в черте города и оказывают значительное влияние на экологическую обстановку города.

Река Енисей практически не замерзает после пуска Красноярской ГЭС и создания водохранилища, что является важным фактором, определяющим состояние микроклимата Красноярска. Создание водохранилища существенно смягчило континентальность климата в пределах трехкилометровой зоны от уреза воды, что особенно заметно зимой. Общий ход температур приобрел более плавный характер. Зимой при температуре ниже  $-30^{\circ}\text{C}$ , температура Енисея  $+3^{\circ}\text{C}$ , из-за чего река «парит» — образуется водяной смог, который концентрирует в себе выбросы ТЭЦ и транспорта (рисунок 2).

Красноярск — один из немногих городов-миллионников в РФ, который обеспечивается электроэнергией от крупной ГЭС рядом с городом, а также Красноярской ГРЭС-2 и комплекса городских ТЭЦ на угле. Регион является энергоизбыточным по электрической мощности. Теплоснабжение города осуществляется от трёх ТЭЦ тепловой мощностью ТЭЦ-1 — 1677 Гкал/час, ТЭЦ-2 — 1405 Гкал/ч, ТЭЦ-3 — 1405 Гкал/ч и угольных котельных суммарной мощностью 2292,84 Гкал/ч [2]. Тепловая нагрузка потребителей составляет свыше 12 тыс. Гкал/ч. В городе Красноярске преобладает централизованное теплоснабжение потребителей коммунально-бытового сектора от ТЭЦ, угольных и электрокотельных.

Теплоснабжение жилищного фонда и объектов социальной сферы города обеспечивается работой 31 теплоисточника, из которых 5 входят в группу компаний



Рисунок 2. Вид на Енисей зимой в центре Красноярска  
Figure 2. The Yenisei River in the center of Krasnoyarsk in winter

Красноярского филиала ООО «СГК» (из них четыре не-эксплуатируемые электрокотельные), 16 находятся в муниципальной собственности и эксплуатируются специализированными организациями, в том числе 7 котельных, которые находятся в аренде ООО «КрасКом», 19 котельных в аренде ООО «КрасТЭК», в собственности прочих теплоснабжающих организаций находятся 10 котельных. Из них 9 предлагаются к выводу из эксплуатации с переключением зон действия на источники комбинированной выработки тепловой и электрической энергии в период с 2018 – 2024 гг. [2]

Фактическая нагрузка ТЭЦ составляет 28522,2 Гкал/ч, фактическая нагрузка котельных составляет 5113,38 Гкал/ч, что говорит о преобладании крупной генерации ТЭЦ.

ТЭЦ-1 обеспечивает теплом и горячей водой более 400 тысяч жителей правого и левого берега р. Енисей г. Красноярска и пригородного поселка Березовка, обеспечивает тепловой энергией крупные промышленные предприятия. ТЭЦ-2 отапливает и снабжает горячей водой Свердловский, Центральный, Железнодорожный и Октябрьский районы Красноярска, поставляет пар предприятиям южного промышленного узла.

ТЭЦ-3 обеспечивает теплом микрорайоны Северный, Иннокентьевский, Взлетка, Покровский, промышленные предприятия Советского района. Температурный график — 150/70 [2–4]. Вредные выбросы по каждой ТЭЦ представлены в таблице 1.

Первая важная предпосылка для комплексных энерго-экологических решений — это наличие значительного количества низкопотенциальной тепловой энергии на территории мегаполиса. Помимо крупных энергоистоников тепловой и электрической мощности город имеет несколько дополнительных источников тепла низкой концентрации: вторичные энергоресурсы предприятий, в том числе Красноярского алюмини-

**Таблица 1.** Данные о вредных выбросах ТЭЦ 1, ТЭЦ 2, ТЭЦ 3  
**Table 1.** Data on harmful emissions of CHPP-1, CHPP-2, CHPP-3

	Зола т/год Ash t/year	SO <sub>2</sub> т/год SO <sub>2</sub> t/year	NO <sub>x</sub> т/год NO <sub>x</sub> t/year
ТЭЦ-1 CHP-1	6139	5682	3501
ТЭЦ-2 CHP-2	2997,56	4950,52	2251,28
ТЭЦ-3 CHP-3	1495,01	10841,8	5280,02

**Таблица 2.** Количество тепла от низкопотенциальных источников  
**Table 2.** Amount of heat from low-potential sources

Источник Source	Количество тепла млн Гкал Heat quantity mln Gcal
КрАЗ (KrAZ)	5
ТЭЦ-1 (CHP-1)	4,38
ТЭЦ-2 (CHP-2)	5,07
ТЭЦ-3 (CHP-3)	1,25
Енисей (Yenisei)	150-200

**Таблица 3.** Варианты использования ТНУ  
**Table 3.** Options for using HP

Вариант Option	Пояснение Explanation
1. Использование ТНУ для дополнительного производства тепла. Use of HP for additional heat production.	Достигается за счет снижении нагрузок теплофикационных отборов паровых турбин. Отпуск теплоты от ТЭЦ и расход топлива остаются без изменения. It is achieved by reducing the loads of cogeneration extraction of steam turbines. Heat release from CHP and fuel consumption remains unchanged.
2. Увеличение отпуска тепла от ТЭЦ. Increase in heat supply from CHP.	Суммарная электрическая нагрузка на ТЭЦ и суммарный расход топлива не меняются. The total electrical load at the CHPP and the total fuel consumption do not change.
3. Снижение расхода топлива. Reducing fuel consumption.	Суммарная выработка электроэнергии и отпуск тепла от ТЭЦ остаются неизменными. The total electricity generation and heat supply from the CHP plant remains unchanged.

евого завода; сбросное тепло ТЭЦ; тепло незамерзающего Енисея.

Суммарные тепловые выбросы от трех ТЭЦ составляют около 8,5 млн Гкал, от КрАЗ около 5 млн Гкал. Наиболее мощным источником низкопотенциальной тепловой энергии является река Енисей (охлаждая Енисей на 1–1,5 градуса, можно получить 150–200 млн Гкал (60 ГВт). Теоретически предполагаемое количество тепла представлен в таблице 2.

Комплекс предлагаемых мер включает в себя установку специального оборудования (обратимых ТНУ) для преобразования низко-потенциального тепла ВЭР, сбросного тепла ТЭЦ в теплоту для отопления центральной части города и хладоснабжения в летнее время. Круглогодичное использование оборудования является второй предпосылкой его эффективной эксплуатации.

Третьей важной предпосылкой комплексных решения является низкая цена электроэнергии в городе (наличие мощной ГЭС), что предопределяет высокую окупаемость проектов с использованием ТНУ. Кроме снижения выбросов в атмосферу, отвод излишнего тепла летом из города также позволит существенно улучшить экологическую ситуацию.

В то же время, по свидетельству ряда экспертов, Енисей в черте города в летнее время стал прогреваться хуже, поэтому поступление в него вторичного тепла от ТНУ также позволит стабилизировать ситуацию. В статье рассмотрены три варианта использования низкопотенциального тепла в ТНУ, которые представлены в таблице 3.

На всех ТЭЦ Красноярска циркуляционное водоснабжение прямоточное, из Енисея. Нагретая вода отводится по пятикилометровому каналу к правой протоке реки. Поэтому в качестве низкопотенциального источника была выбрана охлаждающая вода технического водоснабжения. Выбор такого источника низкопотенциального тепла даст следующие преимущества:

- сокращение количества сбросного тепла;
- снижение температуры циркуляционной воды в

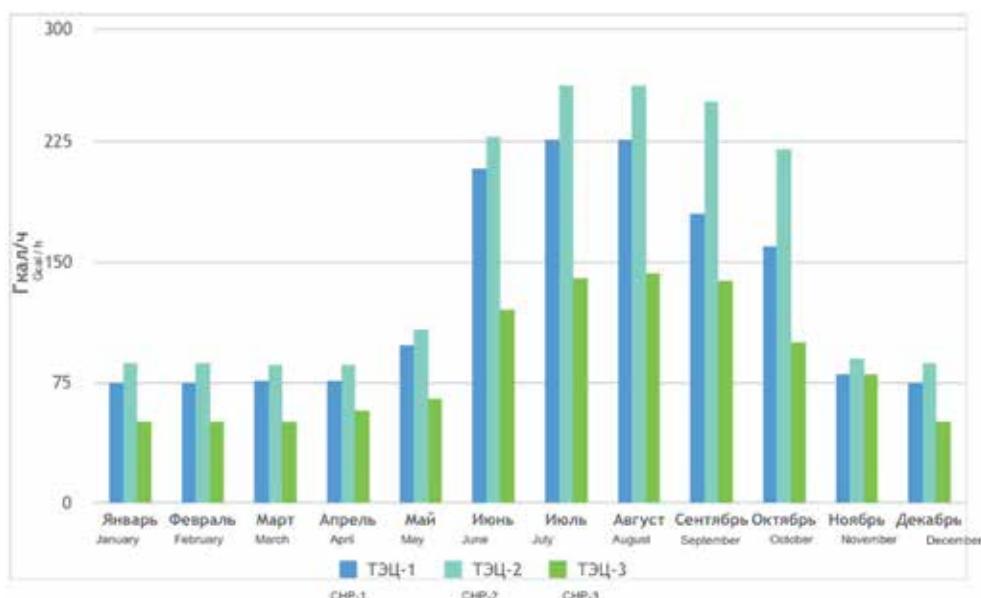


Рисунок 3. Потенциал сбросного тепла

Figure 3. Potential of waste heat

тепловой схеме с паровой турбиной (ПТ) и повышение её тепловой эффективности;

– снижение негативного воздействия на окружающую среду.

Потенциал сбрасываемой воды с ТЭЦ представлен на рисунке 3. Можно заметить, что наибольший потенциал приходится на летний режим. Также данный источник низкопотенциального тепла позволяет подбирать ТН в большом диапазоне мощности.

На станции Красноярска станции работают по графику, который базируется на четырех основных режимах:

- зимний с большим отопительными нагрузками;
- зимний с малыми отопительными нагрузками;
- промежуточный режим;
- летний режим.

Температурный уровень подпиточной воды на Красноярских ТЭЦ усредненно составляет 35°C перед деаэратором и расход пропиточной воды в среднем равен 2200 т/ч, что позволяет установить ТНУ большого диапазона по мощности от 1 до 100 МВт. Таким образом, учитывая все выше сказанное, предполагается место включения ТНУ в тепловую схему ТЭЦ после пучков конденсаторов турбин. Схема представлена на рисунке 4.

В таблице 4 представлены результаты расчета по сопоставлению вариантов использования ТНУ на трёх ТЭЦ, сравнение производилось по величине отпускаемой тепловой энергии, производству электроэнергии, и удельным расходам топлива на выработку электроэнергии и тепловой энергии соответственно.

Таким образом, анализируя полу-

ченные результаты, можно отметить, что при применении варианта 1 и 2 увеличивается расход электроэнергии на собственные нужды, при варианте 3 он остается без изменения. Вариант 2 представляется наиболее выгодным, поскольку дает наибольшее снижение удельного расхода топлива. Вариант 3 показывает незначительное уменьшение в пределах допускаемой погрешности. Дополнительная выработка теплоты при использовании второго варианта составила порядка 448 тыс. Гкал, что покрывает пиковую нагрузку на ТЭЦ-1. Срок окупаемости варьируется от 4 до 8 лет, как показано в [2] срок окупаемости зависит от тарифа на электроэнергию. Кроме того, снижение удельных рас-

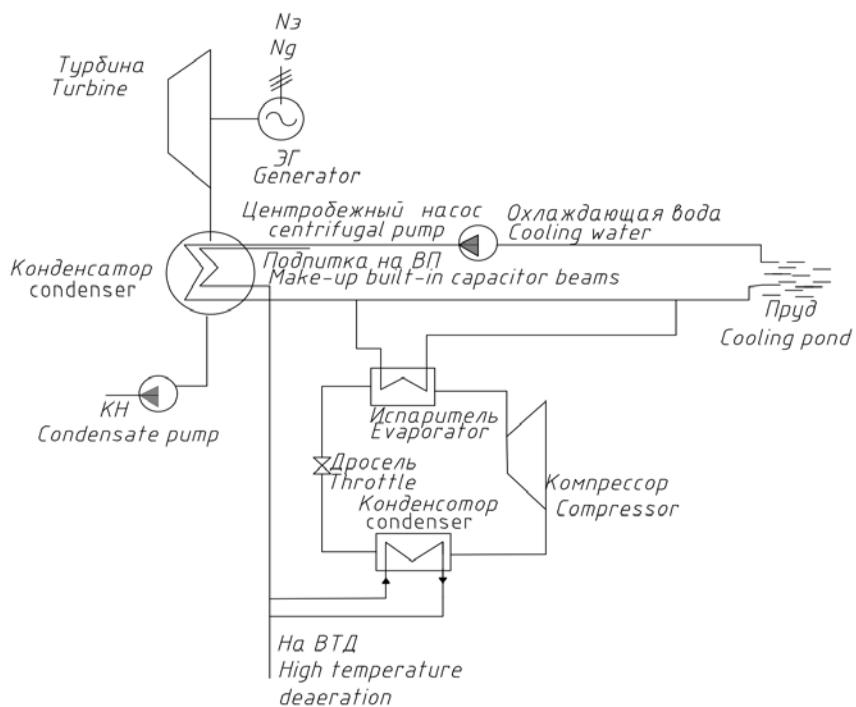


Рисунок 4. Схема теплонаносной установки  
Figure 4. Diagram of heat pump installation

**Таблица 4.** Результаты расчёта применения ТНУ на трёх станциях Красноярска  
**Table 4.** Results of calculation of using HP at three Krasnoyarsk plants

Вариант Option	Отпуск тепловой энергии Heat energy supply			Производство электроэнергии Electricity production			Расход электорэнергии на собственные нужды Electricity consumption for own needs			Удельный расход топлива на выработку электроэнергии SFC for electricity generation			Удельный расход топлива на выработку тепловой энергии SFC for heat generation		
	тыс. Гкал thousand Gcal			млн кВт ч million kWh			млн кВт ч million kWh			г/кВт ч g / kWh			кг/Гкал kg / Gcal		
	ТЭц-1/ СНР-1	ТЭц-2/ СНР-2	ТЭц-3/ СНР-3	ТЭц-1/ СНР-1	ТЭц-2/ СНР-2	ТЭц-3/ СНР-3	ТЭц-1/ СНР-1	ТЭц-2/ СНР-2	ТЭц-3/ СНР-3	ТЭц-1/ СНР-1	ТЭц-2/ СНР-2	ТЭц-3/ СНР-3	ТЭц-1/ СНР-1	ТЭц-2/ СНР-2	ТЭц-3/ СНР-3
Без ТНУ (БАЗА+ПИК) Without HP (BASE + PEAK)	1677	1259	632	1760	2221	1114	88	112	56	307,8	270,3	292,7	147,2	140,1	162,4
1. Нвыр Nyr	1677	1259	632	1861	2324	1215	158	181	102	305,3	268,4	288,1	147,5	140,1	162,5
2. Qот Q th	2125	1662	1003	1758	2220	1112	147	172	93	298	259	279	143	134	157
3. Экономия топлива Fuel economy	1678	1261	635	1760	2221	1114	88	112	56	307,5	270,1	292,4	145,2	138,1	159,4

ходов топлива при применении ТНУ повышает экологическую безопасность станции.

Использование сбросного тепла от ТЭЦ даст возможность закрыть неэффективные котельные. В таблице 5 представлены наиболее проблемные котельные города в зоне покрытия тепловых нагрузок от ТЭЦ. Это позволит получить сокращение выбросов в атмосферу от угольных котельных и уменьшить себестоимость производства тепловой энергии.

Красноярский алюминиевый завод — один из крупнейших производителей алюминия в мире [5]. На долю КрАЗа приходится около 27,6% алюминия, производимого в России, и 2% объема мирового производства. На Красноярском алюминиевом заводе имеются 25 корпусов электролиза, отделение по производству анодной массы и литейное отделение. На заводе осуществляется производство алюминия: первичного алюминия, высокой чистоты и алюминиевых сплавов. Схема производства первичного алюминия представлена на рисунке 5, а также указаны основные источники и виды выбросов. В результате процессов в электролизёрах и после «мокрой» доочистки, происходят выбросы вредных веществ, таких как: фтороводород HF, F (фтор), оксиды серы (SO<sub>2</sub>), пыль и смолистые вещества [6].

Завод ежегодно производит более 1 млн. тонн алюминия, производство которого высокоэнергоёмкое. Основным источником энергии является Красноярская ГЭС. Потребление энергии на производство 1 тонны алюминия составляет примерно 13,5 млн Гкал. На рисунке 3 показаны потери первичной и конечной

энергии. Таким образом, из 13,5 млн. 60% теряется и выбрасывается в атмосферу и только 5,2 млн Гкал, что составляет 40%, потребляется в процессе электролиза. Для использования низкотенденциального тепла предполагается включение в схему теплонаносной станции.

Для минимизации потерь тепла и дальнейшего их использования предполагается в процессе электролиза установить воздушные теплообменные аппараты. Энергетический эффект от данных мероприятий представлен в таблице 6. Как можно заметить, после модернизации процессов выбросы сократятся более чем в 1,5 раза, и составят уже не 60%, а 40%.

Из данных на рисунке 6 и в таблице 5 следует, что завод может отдавать городу около 3 млн Гкал, в резуль-

**Таблица 5.** Замена угольных котельных  
**Table 5.** Replacement of coal-fired boiler houses

Название Name	Удельный расход топлива, кг.у.т/Гкал Specific fuel consumption, kg.c.t./Gcal	Отпущенная теплота Гкал/ч Released heat Gcal / h	ТЭЦ СНР
Котельная №7 Boiler room No. 7	264,55	0,319	ТЭц-3 СНР-3
Котельная №12 Boiler room No. 12	255,1	5,1	ТЭц-3 СНР-3
ООО УК Мекран LLC UK Mekran	1255,86	0,822	ТЭц-3 СНР-3
Ул. Полярная, 17а St. Polyarnaya, 17a	246,31	0,06	ТЭц-2 СНР-2
Ул. Гагарина, 48 St. Gagarin, 48	248,3	0,418	ТЭц-2 СНР-2
Ул. Ст. Разина St. Art. Razin	242,13	0,149	ТЭц-2 СНР-2
Ул. Диксона St. Dixon	246,31	0,469	ТЭц-2 СНР-2
Всего Total		6,515	

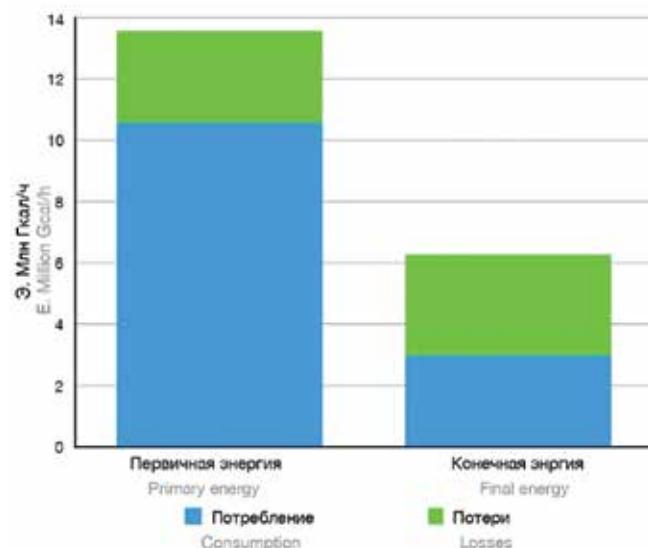


Рисунок 5. Потребление алюминиевого завода

Figure 5. Consumption of aluminium plant

тате город может ликвидировать неэффективные и экологически опасные угольные котельные. Такая замена приведёт к сокращению вредных выбросов на 15%. Но это будет возможно только при соблюдения техниче-

ского регламента (параметры отпускаемого теплоносителя, температурный график, сменность и сезонность работы и т. д.). Экономическая эффективность зависит от многих параметров, в том числе и от технической возможности.

Енисей делит Красноярск на левый и правый берег. Саяно-Шушенская ГЭС расположена на большом расстоянии около 580 км ниже по течению, также в 510 км расположена Майнская ГЭС. Такая отдалённость расположения ГЭС означает, что данные станции практически не влияют на уровень воды и скорость реки в городе.

Енисей является самым крупным потенциальным источником низкопотенциальной энергии, и в этих условиях наиболее эффективным источником могут стать ТНУ, использующие теплоту речной воды. Тепловые насосы большой мощности, использующие тепло воды для теплохладоснабжения, в настоящее время распространены в Швеции и в Финляндии. Производство отечественных парокомпрессионных тепловых насосов большой мощности осуществляется в г. Новосибирске, тепловая мощность достигает 3 МВт. Производство ТНУ с центробежными компрессорами также организовано в г. Казань, их тепловая мощность достигает 11,5 МВт.

Рабочим телом ТНУ может быть фреон третьего по-

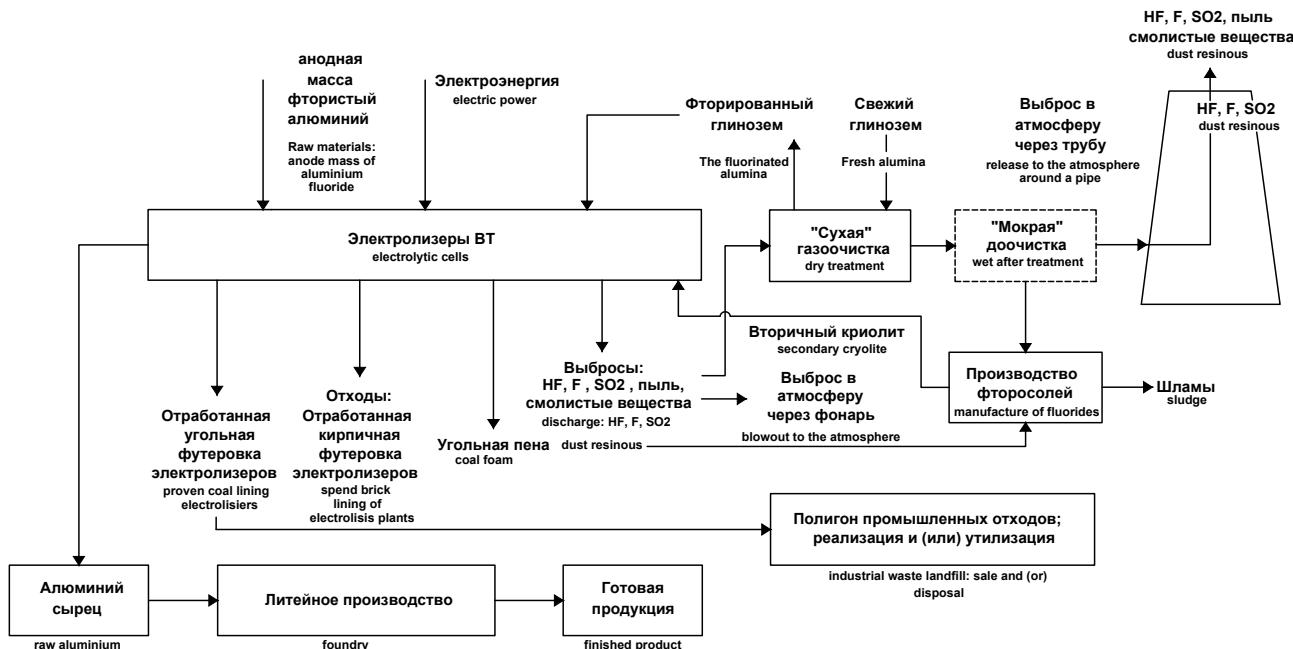


Рисунок 6. Схема производства первичного алюминия

Figure 6. Primary aluminium production chart

Таблица 6. Энергетический эффект КрАЗ

Table 6. Energy effect of Krasnoyarsk Aluminium Plant

Место внедрения Place of implementation	Оборудование Equipment	Получаемая энергия, млн Гкал Received energy, mln Gcal	Оставшиеся выбросы, млн Гкал Remaining emissions, mln Gcal
Электролиз Electrolysis	Воздушные теплообменные аппараты Air heat exchangers	2,4	5
Система оборотного водоснабжения Circulating water supply system	ТНУ / НР	0,6	

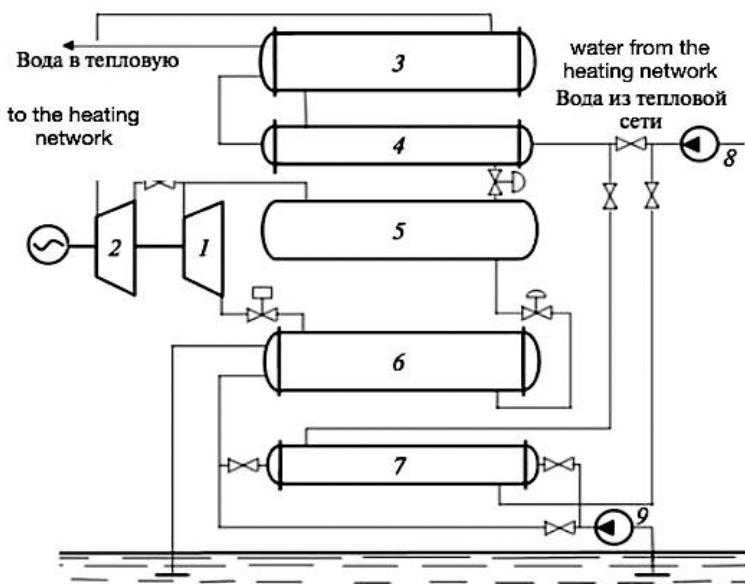


Рисунок 7. Принципиальная схема ТНУ:

1 — первая ступень компрессора, 2 — вторая ступень компрессора, 3 — конденсатор, 4 — промежуточный сосуд, 6 — испаритель, 7 — подогреватель речной воды, 8 — сетевой насос, 9 — насос подачи речной воды

Figure 7. Schematic diagram of heat pump installation:

1 — first stage of compressor, 2 — second stage of compressor, 3 — condenser, 4 — intermediate vessel, 6 — evaporator, 7 — river water heater, 8 — district heating pump, 9 — river water delivery pump

коления R-344a, обладающий необходимыми термодинамическими характеристиками. Также нужно отметить, что температура кипения рабочего вещества должна быть выше 0°C для того, чтобы избежать замерзания речной воды. Одноступенчатые ТНУ показывают свою эффективность, когда необходимо нагреть воду до 60°C, это обуславливается ограниченной степенью сжатия до 7. На рисунке 7 приведена принципиальная схема теплонаносной установки, в которой благодаря двухступенчатому сжатию обеспечивается степень сжатия 10, а промежуточный сосуд позволяет осущес-

твить сепарацию фреона и снизить нагрузку первой ступени компрессора. Из промежуточного сосуда пары фреона поступают во вторую ступень компрессора. Также в этих случаях возможно использование каскадных схем ТНУ, в которых давление в промежуточном сосуде может составлять 1 МПа.

Коэффициент трансформации зависит от температуры речной воды линейно: чем выше температура, тем выше эффективность. Для исключения данной зависимости предусмотрено использование схемы с предварительным подогревом воды, однако, такой вариант решения может приводить к увеличению расхода электроэнергии.

В Красноярске введется строительство административных и жилых зданий. Суммарная тепловая нагрузка, согласно актуализированной Схеме теплоснабжения города, составляет значительную величину 803 Гкал/ч. Полученное вторичное тепло от Енисея, от ТЭЦ и от КрАЗ позволяет удовлетворить спрос. В таблице 7 пред-

ставлены районы города и соответствующие источники теплоснабжения. Срок окупаемости предложенных решений составляет 6–8 лет. При этом основными ограничениями для реализации являются технические возможности выдачи тепловой энергии соответствующих параметров.

Технические требования для Красноярского алюминиевого завода (КрАЗ) должны:

- соответствовать параметрам отпускаемого теплоснабжителя;
- соответствовать температурному графику и преде-

Таблица 7. Варианты теплоснабжения районов города

Table 7. Options of heating supply of city boroughs

Названия района District names	Суммарная тепловая нагрузка Total heat load	Источник Source	% обеспеченности % supply	Компенсация недовыработки Compensation for un- derproduction	Хладоснабжение Cold supply
Железнодорожный Railway	16,4	ТНУ TPS	100%	КрасТЭК / KrasTEK	10 МВт 10 MW
Центральный Central	122,7	ТЭЦ-2-ТНУ CHP-2-TPS	100%		-
Советский Soviet	203	КрАЗ KrAZ	100%	ТЭЦ-3 CHP-3	-
Кировский Kirovsky	37,6	ТЭЦ-1-ТНУ CHP-1-TPS	100%	ТЭЦ-1 CHP-1	-
Свердловский Sverdlovsk	89,1	ТНУ TPS	35,6% (40 Гкал/ч) 35,6% (40 Gcal / h)	ТЭЦ-2 CHP-2	9 МВт 9 MW
Ленинский Leninist	25,2	ТНУ TPS	78,43% (20 Гкал/ч) 78,43% (20 Gcal/h)	ТЭЦ-1 CHP-1	9 МВт 9 MW
Общий итог / Total	857				

**Таблица 8.** Результаты экономии топлива и экологической эффективности  
**Table 8.** Results of fuel-saving and environmental efficiency

Объект Object	Сокращение сжигания топлива тыс. т/год Reduction of fuel combustion thousand tons/year	Сокращение выбросов % Reduction of emissions %
ТЭЦ-ТНУ CHP-TPS	145	4
КрАЗ KraZ	829	Выбросы от производства 20%, сокращение выбросов от ТЭЦ 25% Emissions from production 20%, reduction of emissions from CHP plants 25%
Енисей Yenisei	400 — в зависимости от мощности и количества ТНУ 400 — depending on the power and the number of HPS	68

лам регулирования;

– учитывать сменность и сезонность работы КрАЗ;  
– удовлетворять надежности и бесперебойности работы оборудования по утилизации сбросного тепла, при вводе или выводе производственных циклов.

Ограничение для использования ТНУ:

– производство ТНУ большой мощности развито преимущественно в западных странах;  
– необходимо обеспечить бесперебойность теплоснабжения.

Комплекс предлагаемых мер позволяет сократить выбросы в атмосферу, улучшить экологическую обстановку города [7, 8]. В таблице 8 представлены результаты экономии топлива, экологической эффективности от ТЭЦ-ТНУ, от использования ВЭР на КрАЗ и использования теплоты Енисея. Сокращение расхода топлива при использовании Енисея в качестве источника низкопотенциального тепла для ТНУ определялось относительно угольной котельной, сокращение расхода топлива на КрАЗ определялось сокращением расхода топлива от ТЭЦ на величину тепловой мощности КрАЗ.

Использование ВЭР для теплохладоснабжения городских потребителей может осуществляться как по зонам вокруг источников ВЭР, так и в целом по всей городской системе теплоснабжения. Второй вариант требует дополнительной проработки режимов перекачки теплоносителя и совместной работы ТЭЦ и ВИТ (вторичных источников тепла).

## Список использованных источников

1. Градирню ТЭЦ-3 в Иванове снесли направленным взрывом. [Электронный ресурс]. – [https://ivteleradio.ru/news/2019/06/29/gradirnyu\\_tec\\_3\\_v\\_ivanove\\_snesli\\_napravlennym\\_vzryvom\\_video\\_](https://ivteleradio.ru/news/2019/06/29/gradirnyu_tec_3_v_ivanove_snesli_napravlennym_vzryvom_video_) (Дата обращения 10.10.2019).
2. Схема теплоснабжения города Красноярск [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docplayer.ru/84142-Shema-teplosnabzheniya-goroda-krasnoyarska-do-2033-goda.html> (Дата обращения 25.10.2019).
3. Немченко Н. И. Теплонасосная установка – перспективный ис-

точник теплоснабжения поселка [электронный ресурс]. <http://www.promen.energy-journals.ru/index.php/PROMEN/article/view/289> (дата обращение 10.10.2020).

4. Национальный проект «Экология». Программа «Чистая страна». План сокращения выбросов в атмосферу в г. Красноярске. [Электронный ресурс] <https://strategy24.ru/rf/ecology/projects/natsional-nnyy-proyekt-ekologiya> (дата обращения 1.05.2020).

5. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям при производстве алюминия. [Электронный ресурс] <http://docs.cntd.ru/document/564068890> (дата обращения 10.05.2020).

6. Структура Красноярского металлургического завода: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://kramz-trade.ru/about/production/prokatniy\\_uchastok.html](http://kramz-trade.ru/about/production/prokatniy_uchastok.html) (дата обращения: 01.05.2020).

7. Гашо Е. Г. Разработка методологии совершенствования промышленных и коммунальных теплоэнергетических систем: Автореферат дис. д-ра техн. наук: НИУ «МЭИ» 2018.

8. Гашо Е. Г., Зубкова А. Г., Фрей Д. А. Анализ экономических аспектов воздействия климатических факторов на энергокомплекс Москвы при формировании стратегии адаптации к изменению климата // Научные труды Вольного экономического общества России 2019. №2. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ekonomicheskikh-aspektov-vozdeystviya-klimaticheskikh-faktorov-na-energokompleks-moskvy-pri-formirovaniyu-strategii-adaptatsii-k> (дата обращения: 08.06.2020).

## References

1. The cooling tower of CHPP-3 in Ivanovo is demolished with direct-ed blasting. [Online resource]. – [https://ivteleradio.ru/news/2019/06/29/gradirnyu\\_tec\\_3\\_v\\_ivanove\\_snesli\\_napravlennym\\_vzryvom\\_video\\_](https://ivteleradio.ru/news/2019/06/29/gradirnyu_tec_3_v_ivanove_snesli_napravlennym_vzryvom_video_) (Date of retrieval: Oct 10, 2019).
2. Krasnoyarsk city heat supply diagram [Online resource]. – Access mode: <http://docplayer.ru/84142-Shema-teplosnabzheniya-goroda-krasnoyarska-do-2033-goda.html> (Date of retrieval: Oct 25, 2019).
3. Nemchenko N. I. Heat plant units as a promising source of heat supply of a settlement [online resource]. <http://www.promen.energy-journals.ru/index.php/PROMEN/article/view/289> (date of retrieval Oct 10, 2020).
4. Ecology national project. Clean Country program. Plan of reducing atmospheric emissions in the city of Krasnoyarsk. [online resource] <https://strategy24.ru/rf/ecology/projects/natsional-nnyy-proyekt-ekologiya> (date of retrieval: May 01, 2020).
5. Engineering information reference book for the best available aluminium production technologies. [online resource] <http://docs.cntd.ru/document/564068890> (date of retrieval: May 10, 2020).
6. Structure of Krasnoyarsk Metallurgy Plant: [Online resource]. – Access mode: [http://kramz-trade.ru/about/production/prokatniy\\_uchastok.html](http://kramz-trade.ru/about/production/prokatniy_uchastok.html) (date of retrieval: May 01, 2020).
7. Gasho Ye. G. Development of a methodology for improving industrial and municipal thermal power systems: Abstract of doctoral thesis (Dr. Eng.): NRU MPEI 2018.
8. Gasho Ye. G., Zubkova A. G., Frey D. A. Analysis of economic aspects of the impact of climate factors on the Moscow energy complex when forming a strategy for adaptation to climate change // Scientific Proceedings of the Free Economic Society of Russia 2019. No.2. [online resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ekonomicheskikh-aspektov-vozdeystviya-klimaticheskikh-faktorov-na-energokompleks-moskvy-pri-formirovaniyu-strategii-adaptatsii-k> (date of retrieval: Jun 08, 2020).