

## Оценка надежности теплоотпуска источниками теплоснабжения

*Е.А. Кикоть, к.т.н., генеральный директор, ООО «Невская Энергетика»*

*С.Н. Кириухин, к.т.н., доцент, ведущий специалист, ООО «Невская Энергетика»*

*А.О. Шиманская к.т.н., доцент, ООО «Невская Энергетика»*

*Оценка надежности теплоотпуска источниками теплоснабжения (ИТ) потребителям тепловой энергии (ПТЭ) остается одной из актуальных задач при разработке мероприятий по обеспечению надежного функционирования систем централизованного теплоснабжения (СЦТ), так как именно ИТ являются основными элементами этих систем.*

*Категории ИТ и ПТЭ, а также состав и значения показателей надежности (ПН) элементов СЦТ, определены положениями [1], [2], [3] и [4]. Количественно оценить ПН ИТ возможно различными методами, основные группы которых описаны в [5]. Часть этих методов нормировано [6], [7]. Учитывая несомненные достоинства каждого метода, обращает на себя внимание то обстоятельство, что некоторые из них, существенно упрощены (например, аналитико-статистический метод, нормированный в [6]) и дают весьма приближенные оценки анализируемых свойств при минимально необходимом объеме исходных данных. Другая часть нормированных методов [7], позволяет получить достаточно точные оценки, но при этом обладают повышенной трудоемкостью и предъявляют жесткие требования к описанию структуры объектов анализа, объему и достоверности исходных данных, а также квалификации и профессиональной подготовке персонала.*

*Вместе с тем, ориентируясь на специфику достижения конечной цели в виде перечня конкретных мероприятий по обеспечению источником надежного теплоотпуска, очевидной задачей становится разработка компромиссного метода оценки ПН ИТ, позволяющего при минимально необходимом объеме достоверных данных и действующих нормативных требованиях, оценить надежность поставок тепловой энергии в текущем техническом состоянии основных элементов СЦТ.*

*Следует обратить внимание на то, что предлагаемая в публикации технология оценки, является вариантом развития интегральных методов оценивания надежности элементов СЦТ, ранее опубликованных в [5] и [8].*

*Ключевые слова:* система централизованного теплоснабжения, источник теплоснабжения, тепловые сети, потребитель тепловой энергии, категория надежности теплоснабжения, показатель надежности, интенсивность отказов, время восстановления после отказов, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности.

*ИТ, как элементы СЦТ, несмотря на широкий диапазон единичных мощностей, разнообразие типоразмеров основного и вспомогательного оборудования, различные виды используемого топлива, имеют ряд общих*

функционально-технологических и структурных особенностей [5], анализ и учет которых позволяет корректно определить последовательность решения задачи в рамках ограничений, установленных действующими нормативными требованиями. Пример разработки последовательности решения такой задачи представлен ниже.

Известно, что по надежности теплоотпуска ИТ классифицированы в двух категориях: первой и второй [1]. В нормативных документах [1], [2], [3] и [4] указано, что если в СЦТ есть ПТЭ первой категории (больницы, родильные дома, детские дошкольные учреждения с круглосуточным пребыванием детей, картинные галереи, химические и специальные производства, шахты и т.п.), то независимо от категории ИТ теплоотпуск таким потребителям должен обеспечиваться непрерывно, в расчетном количестве теплоты и не должен допускать снижения температуры воздуха в помещениях ПТЭ ниже предусмотренных [8] и [9]. Для ИТ второй категории (имеющих ПТЭ второй категории) при отказах оборудования как ИТ, так и тепловых сетей (ТС), допускается соответствующее снижение температуры воздуха в помещениях (в зависимости от назначения помещения) ПТЭ, на время восстановления работоспособного состояния оборудования ИТ (ТС), но не более 54 ч [1], [2], [3], [4]. При этом, независимо от категории ИТ, для каждой категории ПТЭ, нормируется допустимое снижение относительной подачи теплоты в зависимости от расчетной (для проектирования отопления) температуры наружного воздуха [1], [2], [3], [4]. Кроме того, в [1], [3] и [4] нормируется максимально допустимый предел отключаемой в ИТ мощности теплогенерирующей (котельной) установки, а в [2] – значения вероятности безотказной работы ИТ и коэффициент готовности СЦТ к исправной работе.

Перечисленные требования, в данном случае, являются нормированными ограничениями, которые формируют состав анализируемых ПН ИТ и их допустимые (нормированные) значения (или нормированные диапазоны значений). Отклонение вычисленных значений ПН (или обработанных исходных данных) за допустимые диапазоны, используется как оценочный признак, позволяющий как количественно, так и качественно оценить надежность теплоотпуска ИТ, а также разработать перечень мероприятий для ее обеспечения.

Таким образом, надежность теплоотпуска ИТ в соответствии с положениями [1], [2], [3], [4], [11] и [12], оценивается численными значениями ПН, состав которых представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели надежности источников теплоснабжения

Показатель, ед. изм.	Обозначение	Значение (диапазон значений)	Нормативный документ
Вероятность безотказной работы ИТ, отн. ед.	$P_i$	0,97	п. 6.26 СП 124.13330.2012
Коэффициент готовности ИТ, отн. ед.	$K_G$	Для ИТ не нормировано	п. 7.1 ГОСТ Р 55173-2012; п. 6.1 ГОСТ Р 50831-2025
Время восстановления (перерыв в подаче расчетного количества теплоты и снижения температуры воздуха в помещениях) работоспособного состояния оборудования ИТ, ч	$\tau_{\text{Вдоп}}^{\text{И}}$	В зависимости от категории ПТЭ: – ПТЭ первой категории: $\tau_{\text{Вдоп}}^{\text{И}} = 0$ , ч; – ПТЭ второй категории:	п. 4.8 СП 89.13330.2016; п. 4.2 СП 124.13330.2012; п. 108_1 Постановление Правительства РФ № 808 от 08.08.2012;

Показатель, ед. изм.	Обозначение	Значение (диапазон значений)	Нормативный документ
		$\tau_{\text{вдоп}}^{\text{И}} = 54, \text{ ч}$ – ПТЭ третьей категории – не нормировано	п. 26_3 Постановление Правительства РФ № 408 от 31.03.2025
Температура воздуха в помещениях ПТЭ в конце периода восстановления работоспособного состояния оборудования ИТ, °С	$t_{\text{в}}^{\text{доп}}$	В зависимости от категории ПТЭ: – ПТЭ первой категории: $t_{\text{в}}^{\text{доп}} = t_{\text{в}}^{\text{р}}, \text{ °С}$ где $t_{\text{в}}^{\text{р}}$ – расчетная температура воздуха в помещении (в зависимости от назначения) по СанПиН 1.2.3685-21 и ГОСТ 30494-2011; – ПТЭ второй категории в помещениях: 1) жилых и общественных зданий: $t_{\text{в}}^{\text{доп}} = 12, \text{ °С}$ 2) промышленных зданий: $t_{\text{в}}^{\text{доп}} = 8, \text{ °С}$ – ПТЭ третьей категории – не нормирована	п. 4.8 СП 89.13330.2016; п. 4.2 СП 124.13330.2012; п. 108_1 Постановление Правительства РФ № 808 от 08.08.2012; п. 26_3 Постановление Правительства РФ № 408 от 31.03.2025
Допустимое снижение относительной подачи теплоты (тепловой мощности) потребителям, %	$\varphi_{\text{ав}}^{\text{И}}$	В зависимости от категории ПТЭ и расчетной температуры наружного воздуха для проектирования отопления	п. 4.16 СП 89.13330.2016; п. 5.5 СП 124.13330.2012; п. 108_1 Постановление Приложение 3, п. 2 Правительства РФ № 808 от 08.08.2012; Приложение 3, п. 2 Постановление Правительства РФ № 408 от 31.03.2025

Следует отметить, что неопределенность в нормировании численного значения коэффициента готовности ИТ к теплоотпуску (таблица 1), компенсируется наличием требований к численному значению коэффициента готовности СЦТ в целом, нормированным [2] (см. п. 6.29).

Последовательность расчета численных значений ПН, указанных в таблице 1, предлагается следующая.

1. Определяется тепловая мощность ИТ:

$$Q^{\text{И}} = Q_{\text{нетто}}^{\text{И}}, \text{ Гкал/ч} \quad (1)$$

где  $Q^{\text{И}}$  – тепловая мощность ИТ, Гкал/ч;

$Q_{\text{нетто}}^{\text{И}}$  – тепловая мощность ИТ, соответствующая тепловой мощности ИТ «нетто» (т.е. разность располагаемой мощности ИТ и мощностью, потребляемой оборудованием ИТ на «собственные нужды»). Потери мощности при передаче тепловой энергии по ТС не учитываются), Гкал/ч.

2. Определяется значение допустимого снижения относительной подачи теплоты потребителям:

$$\varphi_{\text{ав}}^{\text{И}} = f(t_{\text{н}}^{\text{р}}, k_{\text{I,II,III}}^{\text{ПТЭ}}), \% \quad (2)$$

где  $\varphi_{\text{ав}}^{\text{И}}$  – допустимое снижение относительной подачи теплоты (тепловой мощности), %;

$t_{\text{н}}^{\text{р}}$  – расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления, °С;

$k_{\text{I,II,III}}^{\text{ПТЭ}}$  – категория ПТЭ.

3. Определяется снижение тепловой мощности ИТ при отказах котельных установок (КУ):

– ИТ с подключенными ПТЭ первой категории:

$$Q_{ав}^и = Q^и - Q_{куmax}^и, \text{ Гкал/ч} \quad (3)$$

где  $Q_{ав}^и$  – тепловая мощность ИТ при отказах КУ, Гкал/ч.

$Q_{куmax}^и$  – тепловая мощность КУ наибольшей производительности, Гкал/ч;

– ИТ с подключенными ПТЭ второй и третьей категории:

$$Q_{ав}^и = Q^и - Q_{ку}^и, \text{ Гкал/ч} \quad (4)$$

где  $Q_{ку}^и$  – тепловая мощность одной КУ, Гкал/ч.

4. По данным теплоснабжающих организаций (ТСО), определяется текущее значение интенсивности отказов оборудования ИТ:

$$\lambda_{и} = \frac{\sum_i^N n_i}{\tau_{оп}}, \text{ ед./год (ед./ч)} \quad (5)$$

где  $\lambda_{и}$  – текущее значение интенсивности отказов оборудования ИТ (за период  $\tau_{оп}$ ), ед./год (ед./ч);

$N$  – общее количество отказов оборудования ИТ, снизивших (полностью прекративших) теплоотпуск, ед.;

$n_i$  –  $i$ -й отказ оборудования ИТ, снизивший (полностью прекративший) теплоотпуск, ед.;

$\tau_{оп}$  – продолжительность отопительного периода, год (ч).

Необходимо отметить, что суммарное количество отказов ИТ, ставших причиной частичного снижения (или полного прекращения) теплоотпуска, включает количество отказов, возникающих во внешних (сервисных) технических системах в анализируемом промежутке (как правило пять лет, или пять отопительных периодов) времени, обеспечивающих функционирование ИТ, а именно: системах топливоснабжения, электроснабжения и водоснабжения. Таким образом в расчете учитывается статистика отказов внешних технических систем, которая оказывает влияние на надежность теплоотпуска ИТ:

$$\sum_i^N n_i = \sum_j^M m_j^{КУ} + \sum_k^S s_k^{СТС} + \sum_l^H h_l^{СЭС} + \sum_z^U u_z^{СВС}, \text{ ед.} \quad (6)$$

где  $\sum_i^N n_i$  – суммарное количество отказов оборудования ИТ (за период  $\tau_{оп}$ ), ед.;

$\sum_j^M m_j^{КУ}$  – суммарное количество отказов оборудования котельных установок (КУ) ИТ (за период  $\tau_{оп}$ ), ед.;

$\sum_k^S s_k^{СТС}$  – суммарное количество отказов оборудования систем топливоснабжения (СТС) ИТ (за период  $\tau_{оп}$ ), ед.;

$\sum_l^H h_l^{СЭС}$  – суммарное количество отказов оборудования систем электроснабжения (СЭС) ИТ (за период  $\tau_{оп}$ ), ед.;

$\sum_z^U u_z^{СВС}$  – суммарное количество отказов оборудования систем водоснабжения (СВС) ИТ (за период  $\tau_{оп}$ ), ед.

Если исходные данные по отказам оборудования ИТ отсутствуют (т.е. не предоставлены ТСО или др. причина), тогда:

$$\lambda_{и} = \lambda_{и_0}, \text{ ед./год (ед./ч)} \quad (7)$$

где  $\lambda_{и_0}$  – интенсивность отказов оборудования ИТ, соответствующая средней (справочной) статистике отказов типового (аналогичного) оборудования, за период  $\tau_{оп}$ , ед./год (ед./ч). В качестве источников справочной информации о значениях интенсивностей отказов типового (аналогичного) оборудования ИТ рекомендуется использовать [5], [13] или паспортные данные (наработка до отказа) отказывавшего (за период  $\tau_{оп}$ ) оборудования.

Если ИТ содержит комплекты однотипного оборудования (однотипные КУ) тогда (см. [5], п.5.3, с. 286, упрощенный вариант расчета):

$$\lambda_{и} = \frac{N_{ку} \cdot \lambda_{и_0} \cdot e^{-\lambda_{и_0} \cdot \tau_{оп}} \cdot (1 - e^{-\lambda_{и_0} \cdot \tau_{оп}})^{N_{ку}-1}}{1 - (1 - e^{-\lambda_{и_0} \cdot \tau_{оп}})^{N_{ку}}}, \text{ ед./год (ед./ч)} \quad (8)$$

где  $N_{ку}$  – количество однотипных КУ (комплектов однотипного оборудования), ед.

5. По данным ТСО определяется среднее значение времени восстановления оборудования ИТ:

$$\bar{\tau}_в^и = \frac{\sum_i^N \tau_{вi}^и}{\sum_i^N n_i}, \text{ ч (ч/отказ)} \quad (9)$$

где  $\bar{\tau}_в^и$  – среднее значение времени восстановления оборудования ИТ (за период  $\tau_{оп}$ ), ч (ч/отказ);

$N$  – общее количество отказов оборудования ИТ, снизивших (полностью прекративших) теплоотпуск, ед.;

$\tau_{вi}^и$  – время восстановления оборудования ИТ, после  $i$ -го отказа, снизившего (полностью прекратившего) теплоотпуск, ч.

Текущее среднее значение времени восстановления оборудования ИТ, после отказов, ставших причиной частичного снижения (или полного прекращения) теплоотпуска, вычисляется с учетом времен восстановления оборудования внешних (сервисных) технических систем (СТС, СЭС и СВС). Таким образом в расчете учитывается статистика восстановлений работоспособности внешних технических систем, которая оказывает влияние на надежность теплоотпуска ИТ:

$$\sum_i^N \tau_{вi}^и = \sum_j^M \tau_{вj}^{КУ} + \sum_k^S \tau_{вk}^{СТС} + \sum_l^H \tau_{вл}^{СЭС} + \sum_z^U \tau_{вz}^{СВС}, \text{ ч} \quad (10)$$

где  $\sum_i^N \tau_{вi}^и$  – суммарное время восстановления оборудования ИТ (за период  $\tau_{оп}$ ), ч;

$\sum_j^M \tau_{вj}^{КУ}$  – суммарное время восстановления оборудования КУ (за период  $\tau_{оп}$ ), ч;

$\sum_k^S \tau_{вk}^{СТС}$  – суммарное время восстановления оборудования СТС (за период  $\tau_{оп}$ ), ч;

$\sum_l^H \tau_{B_l}^{CЭС}$  – суммарное время восстановления оборудования СЭС (за период  $\tau_{оп}$ ), ч;  
 $\sum_Z^U \tau_{B_Z}^{CВС}$  – суммарное время восстановления оборудования СВС (за период  $\tau_{оп}$ ), ч.

Если исходные данные о временах восстановления оборудования ИТ отсутствуют (т.е. не предоставлены ТСО или др. причина), тогда:

$$\bar{\tau}_B^И = \tau_{B_0}^И, \text{ ч} \quad (11)$$

где  $\tau_{B_0}^И$  – время восстановления оборудования ИТ, соответствующее средней (справочной) статистике восстановлений типового (аналогичного) оборудования (за период  $\tau_{оп}$ ), ч. В качестве источников справочной информации о численных значениях времен восстановления типового (аналогичного) оборудования ИТ рекомендуется использовать [5], [13] или паспортные данные (время или продолжительность ремонта) отказывавшего (за период  $\tau_{оп}$ ) оборудования.

6. Рассчитываются вероятность безотказной работы и вероятность отказа ИТ.

Вероятность безотказной работы ИТ (за период  $\tau_{оп}$ ):

$$P_И = e^{-\lambda_И \cdot \tau_{оп}}. \quad (12)$$

Вероятность отказа ИТ (за период  $\tau_{оп}$ ):

$$F_И = 1 - P_И. \quad (13)$$

7. Рассчитываются значение недопоставленной (в результате отказов оборудования ИТ) потребителям тепловой мощности и значение тепловой мощности ИТ, фактически выданное в ТС.

Значение недопоставленной (в результате отказов оборудования ИТ) потребителям тепловой мощности в зависимости от наличия (отсутствия) исходных данных, может быть определено различными способами:

1) Если данные о недопоставленной потребителям тепловой мощности (за период  $\tau_{оп}$ ) в наличии, определяется среднее значение недопоставленной (в результате отказов оборудования ИТ) потребителям тепловой мощности:

$$\bar{Q}_{нед}^И = \frac{\sum_i^N q_{нед_i}^И}{\sum_i^N n_i}, \text{ Гкал/ч} \quad (14)$$

где  $q_{нед_i}^И$  – недопоставленная в результате  $i$ -го отказа оборудования ИТ тепловая мощность, Гкал/ч;

$\bar{Q}_{нед}^И$  – среднее значение недопоставленной (в результате отказов оборудования ИТ) потребителям тепловой мощности, Гкал/ч.

2) Если данные о недопоставленной потребителям тепловой мощности за период  $\tau_{оп}$  отсутствуют, но есть данные об отказах, временах восстановления, расходах и температурах теплоносителя, соответствующих действующим температурным графикам (режимам работам) ИТ и температурам наружного воздуха:

$$q_{\text{нед}i}^{\text{и}} = g_i^{\text{и}} \cdot c \cdot (T_1(t_{\text{н}}) - T_2(t_{\text{н}})), \text{ Гкал/ч} \quad (15)$$

- где  $g_i^{\text{и}}$  – расход теплоносителя в ТС при  $i$ -м отказе оборудования ИТ, кг/ч;  
 $c$  – удельная теплоёмкость теплоносителя (для воды  $c = 4200$  Дж/(кг·°C)), Дж/(кг·°C);  
 $T_1(t_{\text{н}})$  – температура теплоносителя в подающем теплопроводе, соответствующая действующему температурному графику (режиму работы) ИТ и температуре наружного воздуха  $t_{\text{н}}$  в момент возникновения  $i$ -го отказа;  
 $T_2(t_{\text{н}})$  – температура теплоносителя в обратном теплопроводе, соответствующая действующему температурному графику (режиму работы) ИТ и температуре наружного воздуха  $t_{\text{н}}$  в момент возникновения  $i$ -го отказа.

В этом варианте расчета суммарного значения недопоставленной потребителям тепловой мощности учитываются расходы и температуры теплоносителя, соответствующие действующим температурным графикам (режимам работы) ИТ и температурам наружного воздуха.

- 3) Если данные о недопоставленной потребителям тепловой мощности отсутствуют и нет данных об отказах, временах восстановления, расходах и температурах теплоносителя (соответствующих действующим температурным графикам (режимам работам) ИТ и температурам наружного воздуха), тогда выполняется расчет вероятно ожидаемого среднего значения недопоставленной потребителям тепловой мощности:

$$\bar{Q}_{\text{нед}}^{\text{и}} = Q^{\text{и}} \cdot F_{\text{и}}, \text{ Гкал/ч} \quad (16)$$

Среднее значение тепловой мощности ИТ, фактически выданной ПТЭ (фактический теплоотпуск) с учетом отказов КУ ИТ и потерь тепловой мощности в ТС:

$$\bar{Q}_{\text{ф}}^{\text{и}} = Q_{\text{ав}}^{\text{и}} - \bar{Q}_{\text{нед}}^{\text{и}} - Q_{\text{пот}}^{\text{ТС}}, \text{ Гкал/ч} \quad (17)$$

8. Рассчитывается фактическое снижение относительной подачи теплоты (тепловой мощности) при отказах оборудования (КУ) ИТ:

$$\varphi_{\text{авф}}^{\text{и}} = \frac{\bar{Q}_{\text{ф}}^{\text{и}}}{Q_{\text{п}}^{\text{ПТЭ I, II, III}}}. \quad (18)$$

9. Выполняется расчет температуры воздуха в помещениях ПТЭ в конце периода восстановления работоспособного состояния оборудования ИТ.

В расчете используется зависимость, описание которой представлено в нормативном документе [7], (приложение 18, п. 18.2.12):

$$t_{\text{в}} = t_{\text{н}}^{\text{п}} + \frac{t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}^{\text{п}} - \varphi_{\text{авф}}^{\text{и}} \cdot (t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}^{\text{п}})}{e^{\left(\frac{\tau_{\text{в}}^{\text{и}}}{\beta}\right)}} + \varphi_{\text{авф}}^{\text{и}} \cdot (t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}^{\text{п}}), \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (19)$$

где  $t_{\text{в}}$  – температура воздуха в помещениях ПТЭ в конце периода восстановления работоспособного состояния оборудования ИТ, °C;

$\beta$  – коэффициент тепловой аккумуляции, в соответствии с [14].

10. Рассчитывается коэффициент готовности ИТ:

$$K_{\Gamma}^{\text{И}} = \frac{\tau_{\text{р}}}{\tau_{\text{р}} + \bar{\tau}_{\text{в}}^{\text{И}}}$$

где  $\tau_{\text{р}}$  – время пребывания ИТ в работоспособном состоянии, ч.

Если принять, что в течение отопительного периода ИТ находится либо в работоспособном состоянии, либо в состоянии его восстановления (после отказов), тогда время пребывания ИТ в работоспособном состоянии можно представить как:

$$\tau_{\text{р}} = \tau_{\text{оп}} - \bar{\tau}_{\text{в}}^{\text{И}}, \text{ ч} \quad (20)$$

Тогда коэффициент готовности ИТ будет равен:

$$K_{\Gamma}^{\text{И}} = \frac{\tau_{\text{оп}} - \bar{\tau}_{\text{в}}^{\text{И}}}{\tau_{\text{оп}}} \quad (21)$$

11. Проверяется соответствие среднего значения тепловой мощности ИТ, фактически выданной в ТС, минимально допустимому (при отказах) снижению тепловой мощности ИТ.

Если к ИТ подключены ПТЭ первой категории, тогда проверяется условие:

$$\bar{Q}_{\text{ф}}^{\text{И}} \geq Q_{\text{р}}^{\text{ПТЭ I}}, \text{ Гкал/ч} \quad (22)$$

где  $Q_{\text{р}}^{\text{ПТЭ I}}$  – суммарная тепловая мощность ПТЭ первой категории (в расчетном режиме функционирования), Гкал/ч.

Если к ИТ подключены ПТЭ второй и третьей категории, тогда проверяется условие:

$$\bar{Q}_{\text{ф}}^{\text{И}} \geq Q_{\text{доп}}^{\text{ПТЭ II, III}}, \text{ Гкал/ч} \quad (23)$$

где  $Q_{\text{доп}}^{\text{ПТЭ II, III}}$  – допустимое снижение суммарная тепловая мощность ПТЭ второй и третьей категории (в расчетном режиме функционирования) при ликвидации отказов оборудования ИТ, Гкал/ч:

$$Q_{\text{доп}}^{\text{ПТЭ II, III}} = \varphi_{\text{ав}}^{\text{И}} \cdot Q_{\text{р}}^{\text{ПТЭ II, III}}, \text{ Гкал/ч.}$$

12. Проверяется соответствие среднего значения времени восстановления оборудования ИТ после отказов, максимально допустимому (при отказах) времени восстановления.

Если к ИТ подключены ПТЭ первой категории, тогда проверяется условие:

$$\bar{\tau}_{\text{в}}^{\text{И}} = \tau_{\text{в доп}}^{\text{И}}, \text{ ч} \quad (24)$$

Если к ИТ подключены ПТЭ второй категории, тогда проверяется условие:

$$\bar{\tau}_{\text{в}}^{\text{И}} \leq \tau_{\text{в доп}}^{\text{И}}, \text{ ч} \quad (25)$$

где  $\tau_{\text{в доп}}^{\text{И}}$  – максимально допустимое время восстановления оборудования ИТ после отказов, ч.

13. Проверяется соответствие фактического снижения относительной подачи теплоты (из-за отказов оборудования ИТ) допустимому снижению относительной подачи теплоты.

Если к ИТ подключены ПТЭ первой категории, тогда проверяется условие:

$$\varphi_{авф}^И \geq \frac{\bar{Q}_\Phi^И}{Q_p^{ПТЭI}}. \quad (26)$$

Если к ИТ подключены ПТЭ второй и третьей категории, тогда проверяется условие:

$$\varphi_{авф}^И \geq \varphi_{ав}^И. \quad (27)$$

14. Проверяется соответствие ожидаемого (при отказах оборудования ИТ) снижения температуры воздуха в помещениях зданий ПТЭ допустимому по [1] и [2] снижению температуры воздуха в помещениях зданий ПТЭ.

Если к ИТ подключены ПТЭ первой категории, тогда проверяется условие:

$$t_B \geq t_B^P. \quad (28)$$

Если к ИТ подключены ПТЭ второй категории, тогда проверяется условие:

$$t_B \geq t_B^{доп}. \quad (29)$$

15. Проверяется соответствие значения вероятности безотказной работы (ВБР) ИТ требуемому в соответствии с п. 6.26 [2]:

$$P_{и} \geq 0,97. \quad (30)$$

По результатам проверок выполняется оценка надежности теплоотпуска ИТ и разрабатываются мероприятия по обеспечению надежности теплоотпуска.

Надежность теплоотпуска ИТ оценивается в следующем порядке.

1. Условия (22) – (30) группируются в три подгруппы, каждая из которых используется для оценивания надежности теплоотпуска ПТЭ соответствующей категории: первая – условия (22), (24), (26), (28), (30); вторая – (23), (25), (27), (29), (30) и третья – (23), (27), (30). В результате формируются три функции оценивания, в каждой из которых используется свой состав аргументов:

$$C_I^И = f(u_{22}; u_{24}; u_{26}; u_{28}; u_{30}); \quad (31)$$

$$C_{II}^И = f(u_{23}; u_{25}; u_{27}; u_{29}; u_{30}); \quad (32)$$

$$C_{III}^И = f(u_{23}; u_{27}; u_{30}), \quad (33)$$

где  $u_{22, \dots, 30}$  – аргументы функции оценивания надежности теплоотпуска;

$C_{I, II, III}^И$  – значения функций оценивания надежности теплоотпуска ПТЭ первой, второй и третьей категории соответственно.

2. Результаты проверок условий представляются в бинарном виде («выполняется» или «не выполняется», «истина» или «ложь», «1» или «0») и присваивается как значение соответствующего аргумента соответствующих

функций оценивания (31), (32), (33). Все возможные сочетания (полные наборы) значений аргументов функций оценивания (31), (32) и (33) приведены в таблицах 2, 3 и 4.

3. В зависимости от набора значений аргументов функциям оценивания (31), (32) и (33) присваиваются значения, отражающие выполнение (не выполнение) требований п. 4.8, 4.16 [1] и п. 4.2, 5.5, 6.26 [2]. В таблицах 2, 3 и 4 приведены номера наборов значений аргументов и значения функций, которые в дальнейшем используются как исходные данные при формировании перечня мероприятий. По этой причине полные наборы значений аргументов и значений функций (как таблицы истинности двоичных функций) не минимизируются, а применяются для поиска причин отклонения ПН от допустимых значений и последующего кодирования состава (перечней) типовых мероприятий, выполнение которых обуславливает перевод (приведение) технического состояния типового оборудования ИТ в необходимый для выполнения соответствующего условия уровень.

Таблица 2 – Полный набор значений аргументов и значений функции оценивания надежности теплоотпуска потребителям первой категории

Набор №	Условие (соответствие требованиям п. 4.8, 4.16 СП 89.13330.2016; п. 4.2, 5.5, 6.26 СП 124.13330.2012)					Функция $C_I^H$
	$\bar{Q}_\Phi^H \geq Q_p^{ПТЭГ}$	$\bar{t}_B^H = 0$	$\varphi_{авф}^H \geq \frac{\bar{Q}_\Phi^H}{Q_p^{ПТЭГ}}$	$t_B \geq t_B^P$	$P_H \geq 0,97$	
	Аргумент					
	$u_{22}$	$u_{24}$	$u_{26}$	$u_{28}$	$u_{30}$	
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	0	1
3	1	1	1	0	1	0
4	1	1	1	0	0	0
5	1	1	0	1	1	0
6	1	1	0	1	0	0
7	1	1	0	0	1	0
8	1	1	0	0	0	0
9	1	0	1	1	1	0
10	1	0	1	1	0	0
11	1	0	1	0	1	0
12	1	0	1	0	0	0
13	1	0	0	1	1	0
14	1	0	0	1	0	0
15	1	0	0	0	1	0
16	1	0	0	0	0	0
17	0	1	1	1	1	0
18	0	1	1	1	0	0
19	0	1	1	0	1	0
20	0	1	1	0	0	0
21	0	1	0	1	1	0
22	0	1	0	1	0	0
23	0	1	0	0	1	0
24	0	1	0	0	0	0
25	0	0	1	1	1	0
26	0	0	1	1	0	0
27	0	0	1	0	1	0
28	0	0	1	0	0	0
29	0	0	0	1	1	0
30	0	0	0	1	0	0
31	0	0	0	0	1	0
32	0	0	0	0	0	0

Таблица 3 – Полный набор значений аргументов и значений функции оценивания надежности теплоотпуска потребителям второй категории

Набор №	Условие (соответствие требованиям п. 4.8, 4.16 СП 89.13330.2016; п. 4.2, 5.5, 6.26 СП 124.13330.2012)					Функция
	$\bar{Q}_\phi^И \geq Q_{доп}^{ПТЭII}$	$\bar{\tau}_в^И \leq \tau_{вдоп}^И$	$\varphi_{авф}^И \geq \varphi_{ав}^И$	$t_в \geq t_в^{доп}$	$P_и \geq 0,97$	$C_{II}^И$
	Аргумент					
	$u_{23}$	$u_{25}$	$u_{27}$	$u_{29}$	$u_{30}$	
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	0	1
3	1	1	1	0	1	0
4	1	1	1	0	0	0
5	1	1	0	1	1	0
6	1	1	0	1	0	0
7	1	1	0	0	1	0
8	1	1	0	0	0	0
9	1	0	1	1	1	0
10	1	0	1	1	0	0
11	1	0	1	0	1	0
12	1	0	1	0	0	0
13	1	0	0	1	1	0
14	1	0	0	1	0	0
15	1	0	0	0	1	0
16	1	0	0	0	0	0
17	0	1	1	1	1	1
18	0	1	1	1	0	1
19	0	1	1	0	1	0
20	0	1	1	0	0	0
21	0	1	0	1	1	0
22	0	1	0	1	0	0
23	0	1	0	0	1	0
24	0	1	0	0	0	0
25	0	0	1	1	1	0
26	0	0	1	1	0	0
27	0	0	1	0	1	0
28	0	0	1	0	0	0
29	0	0	0	1	1	0
30	0	0	0	1	0	0
31	0	0	0	0	1	0
32	0	0	0	0	0	0

Таблица 4 – Полный набор значений аргументов и значений функции оценивания надежности теплоотпуска потребителям третьей категории

Набор №	Условие (соответствие требованиям п. 4.8, 4.16 СП 89.13330.2016; п. 4.2, 5.5, 6.26 СП 124.13330.2012)			Функция
	$\bar{Q}_\phi^И \geq Q_p^{ПТЭIII}$	$\varphi_{авф}^И \geq \varphi_{ав}^И$	$P_и \geq 0,97$	$C_{III}^И$
	Аргумент			
	$u_{23}$	$u_{27}$	$u_{30}$	
1	1	1	1	1
2	1	1	0	1
3	1	0	1	0
4	1	0	0	0
5	0	1	1	1
6	0	1	0	1
7	0	0	1	0
8	0	0	0	0

4. В документе [6] (п. 12 а), с. 7) нормирована система оценок надежности ИТ без учета положений СП 89.13330.2016 (п. 4.8, 4.16), СП 124.13330.2012 (п. 4.2, 5.5, 6.26) в отношении допустимых отклонений значений ПН теплоотпуска ПТЭ в зависимости от их категории. В связи с этим обстоятельством предлагается актуализировать систему качественных оценок, нормированную в [3] (п. 124) и [6] (п. 12), введением количественной градации

значений вероятности безотказной работы ИТ в зависимости от категории ПТЭ (присоединенных к источнику) и результатов проверки соответствия ПН ИТ требованиям нормативных документов (по значениям функций оценивания). Пример такой системы оценок приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Система оценок надежности теплоотпуска источником тепловой энергии

Категория ПТЭ	Значение функции, $C_{I,II,III}^И$	Диапазон значений ВБР, $P_{и}$	Качественная оценка
Первая	1	0,97 и более	Высоконадежный
		От 0,9 до 0,97	Надежный
		От 0,86 до 0,9	Малонадежный
	0	– (не рассчитывается)	Ненадежный
Вторая	1	0,9 и более	Высоконадежный
		От 0,86 до 0,9	Надежный
		От 0,7 до 0,86	Малонадежный
	0	– (не рассчитывается)	Ненадежный
Третья	1	0,86 и более	Высоконадежный
		От 0,7 до 0,86	Надежный
		Менее 0,7	Малонадежный
	0	– (не рассчитывается)	Ненадежный

В представленной системе оценок градация диапазонов численных значений ВБР ИТ и значений функций оценивания четко соответствует градации нормативных требований к надежности теплоотпуска ИТ в зависимости от категории ПТЭ. Если к ИТ присоединены ПТЭ разных категорий, то надежность теплоотпуска оценивается по «старшей» категории.

**Пример расчета ПН ИТ** приведен ниже, а его результаты представлены в таблице 6.

Оценивается надежность теплоотпуска ТЭЦ города. Исходные данные представлены в следующем составе:

1. Тепловая мощность «нетто»  $Q_{\text{нетто}}^И = Q^И = 335,57$  Гкал/ч.
2. Расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления  $t_n^P = -31$  °С.
3. Допустимое снижение относительной подачи теплоты (тепловой мощности) потребителям  $\varphi_{\text{ав}}^И = 87,2$  %.
4. Категория надежности теплоснабжения ПТЭ ( $k_{I,II,III}^{\text{ПТЭ}}$ ): вторая.
5. Суммарная тепловая мощность ПТЭ второй категории (в расчетном режиме функционирования)  $Q_p^{\text{ПТЭ}II} = 259,013$  Гкал/ч.
6. Продолжительность отопительного периода  $\tau_{\text{оп}} = 4752$  (0,542) ч (год).
7. Расчетная температура воздуха в помещениях ПТЭ  $t_B^P = 20$  °С.
8. Потери тепловой мощности в ТС  $Q_{\text{пот}}^{\text{ТС}} = 85,765$  Гкал/ч.
9. Коэффициент тепловой аккумуляции зданий ПТЭ второй категории  $\beta = 60$  ч.

Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. Снижение тепловой мощности ТЭЦ при отказах КУ:

$$Q_{ав}^и = Q^и - Q_{ку}^и = 335,57 - 48,3 = 287,27 \text{ Гкал/ч.}$$

2. Так как отказов (и восстановлений) оборудования ТЭЦ в период с 2020 по 2024 год не зарегистрировано значение интенсивности отказов типового оборудования ТЭЦ (котлов марки БКЗ-75-39 ФБ, с рабочим давлением 39 кгс/см<sup>2</sup>, производительностью 75 (48,3) т/ч (Гкал/ч)) определено с помощью зависимости (4.12), приведенной в источнике [13] (с. 46):

$$\lambda_{и0} = \frac{0,001 \cdot D_k^{3,54} \cdot e^{-0,00527 \cdot D_k}}{12320 + 3,24 \cdot D_k} = \frac{0,001 \cdot 75^{3,54} \cdot 2,71^{-0,00527 \cdot 75}}{12320 + 3,24 \cdot 75} = 0,233 \text{ ед./год,}$$

где  $D_k$  – производительность котла, т/ч.

Так как в ТЭЦ установлено семь котлов, работающих одновременно:

$$\lambda_{и} = \frac{N_{ку} \cdot \lambda_{и0} \cdot e^{-\lambda_{и0} \cdot \tau_{оп}} \cdot (1 - e^{-\lambda_{и0} \cdot \tau_{оп}})^{N_{ку} - 1}}{1 - (1 - e^{-\lambda_{и0} \cdot \tau_{оп}})^{N_{ку}}} = \frac{7 \cdot 0,233 \cdot 2,71^{-0,233 \cdot 0,542} \cdot (1 - 2,71^{-0,233 \cdot 0,542})^{7-1}}{1 - (1 - 2,71^{-0,233 \cdot 0,542})^7} = 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ ед./год.}$$

3. Так как восстановлений (и отказов) оборудования ТЭЦ в период с 2020 по 2024 год не зарегистрировано значение времени восстановления после отказов оборудования ТЭЦ (котлов марки БКЗ-75-39 ФБ, с рабочим давлением 39 кгс/см<sup>2</sup>, производительностью 75 (48,3) т/ч (Гкал/ч)) определено по таблице 4.2 источника [13] (с. 43):

$$\bar{\tau}_B^и = \tau_{B_0}^и = 87,6 \text{ ч.}$$

4. Вероятность безотказной работы и вероятность отказа ИТ:

$$P_{и} = e^{-\lambda_{и} \cdot \tau_{оп}} = 2,71^{-0,000004 \cdot 0,542} = 0,9999978,$$

$$F_{и} = 1 - P_{и} = 1 - 0,9999978 = 2,2 \cdot 10^{-6},$$

где  $\tau_{оп} = 4752 \text{ ч} = 0,542 \text{ год}$  – продолжительность отопительного периода.

5. Среднее значение недопоставленной ПТЭ тепловой мощности и среднее значение тепловой мощности ТЭЦ фактически выданной ПТЭ второй категории с учетом отказов КУ ИТ и потерь тепловой мощности в ТС:

$$\bar{Q}_{нед}^и = Q^и \cdot F_{и} = 335,57 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} = 0,000073 \text{ Гкал/ч,}$$

$$\bar{Q}_{ф}^и = Q_{ав}^и - \bar{Q}_{нед}^и - Q_{пот}^{ТС} = 287,27 - 0,000073 - 85,765 = 201,5 \text{ Гкал/ч.}$$

6. Допустимое снижение теплоотпуска ПТЭ второй категории:

$$Q_{доп}^{ПТЭII} = \varphi_{ав}^и \cdot Q_p^{ПТЭII} = 0,872 \cdot 259,013 = 225,86 \text{ Гкал/ч.}$$

7. Отношение фактически выданной тепловой мощности ТЭЦ к тепловой мощности ПТЭ второй категории с учетом отказов КУ ИТ и потерь тепловой мощности в ТС:

$$\varphi_{авф}^и = \frac{\bar{Q}_{ф}^и}{Q_p^{ПТЭII}} = \frac{201,5}{259,013} = 0,78.$$

8. Температура воздуха в помещениях ПТЭ в конце периода восстановления работоспособного состояния оборудования ИТ:

$$t_B = t_H^p + \frac{t_B^p - t_H^p - \varphi_{авф}^и \cdot (t_B^p - t_H^p)}{e^{\left(\frac{\beta}{\tau}\right)}} + \varphi_{авф}^и \cdot (t_B^p - t_H^p) = -31 + \frac{20 - (-31) - 0,78 \cdot (20 - (-31))}{2,71^{\left(\frac{87,6}{60}\right)}} + 0,78 \cdot (20 - (-31)) = 11,39 \text{ }^\circ\text{C,}$$

где  $\beta = 60 \text{ ч}$  – коэффициент тепловой аккумуляции;

$t_B^p = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  – расчетная температура воздуха в помещениях.

### 9. Коэффициент готовности ИТ:

$$K_{Г}^{И} = \frac{\tau_{оп} - \bar{\tau}_{В}^{И}}{\tau_{оп}} = \frac{4752 - 87,6}{4752} = 0,981.$$

Таблица 6 – Исходные данные и результаты расчетов показателей надежности источника тепловой энергии

№ пп.	Группа	Показатель, ед./изм.	Обозначение	Значение
1	Исходные данные	Тепловая мощность, Гкал/ч	$Q^{И}$	335,57
2		Потери тепловой мощности в ТС, Гкал/ч	$Q_{пот}^{ТС}$	85,765
3		Категория надежности теплоснабжения ПТЭ	$k_{II,III}^{ПТЭ}$	Вторая
4		Суммарная тепловая мощность ПТЭ второй категории (в расчетном режиме функционирования), Гкал/ч	$Q_{р}^{ПТЭII}$	259,013
5		Продолжительность отопительного периода, ч (год)	$\tau_{оп}$	4752 (0,542)
6		Расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления, °С	$t_{н}^{р}$	- 31
7		Расчетная температура воздуха в помещениях ПТЭ, °С	$t_{в}^{р}$	20
8		Допустимое снижение относительной подачи теплоты (тепловой мощности) потребителям, %	$\varphi_{ав}^{И}$	87,2
9		Коэффициент тепловой аккумуляции, ч	$\beta$	60
10	Результаты расчетов	Снижение тепловой мощности ТЭЦ при отказах КУ, Гкал/ч	$Q_{ав}^{И}$	287,27
11		Интенсивность отказов оборудования, ед./год	$\lambda_{и}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$
12		Среднее время восстановления оборудования после отказов, ч	$\bar{\tau}_{в}^{И}$	87,6
13		Температура воздуха в помещениях ПТЭ в конце периода восстановления работоспособного состояния оборудования, °С	$t_{в}$	11,39
14		Вероятность безотказной работы оборудования	$P_{и}$	0,9999
15		Вероятность отказа оборудования	$F_{и}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
16		Среднее значение недопоставленной ПТЭ тепловой мощности при отказах оборудования ТЭЦ, Гкал/ч	$\bar{Q}_{нед}^{И}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$
17		Среднее значение тепловой мощности при отказах оборудования ТЭЦ, фактически поставляемой с учетом потерь в ТС, Гкал/ч	$\bar{Q}_{\phi}^{И}$	201,5
18		Фактически ожидаемое значение снижения относительной подачи теплоты (тепловой мощности), %	$\varphi_{ав\phi}^{И}$	78
19		Коэффициент готовности	$K_{Г}^{И}$	0,981

10. Проверка условий, определение значений функций оценивания и качественной оценки надежности теплоотпуска ИТ.

Результаты проверки приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты проверки условий соответствия требованиям к надежности теплоотпуска потребителям второй категории

Набор №	Условие (аргумент) (соответствие требованиям п. 4.8, 4.16 СП 89.13330.2016; п. 4.2, 5.5, 6.26 СП 124.13330.2012)					Функция
	$\bar{Q}_{\phi}^{И} \geq Q_{доп}^{ПТЭII} (u_{23})$	$\bar{\tau}_{в}^{И} \leq \tau_{в,доп}^{И} (u_{25})$	$\varphi_{ав\phi}^{И} \geq \varphi_{ав}^{И} (u_{27})$	$t_{в} \geq t_{в,доп}^{доп} (u_{29})$	$P_{и} \geq 0,97 (u_{30})$	$C_{II}^{И}$
	Сравниваемые значения					
	201,5 < 225,86	87,6 > 54	0,78 < 0,872	11,39 < 12	0,999 > 0,97	
Результат сравнения (значение аргументов)						Значение
31	0	0	0	0	1	0

Таблица 8 – Результаты оценки надежности теплоотпуска источником тепловой энергии

Категория ПТЭ	Значение функции $C_{II}^{И}$	Диапазон значений ВБР, $P_{и}$	Качественная оценка
Вторая	0	– (не анализируется)	Ненадежный

**Пример разработки перечня типовых мероприятий** по обеспечению надежности теплоотпуска ИТ потребителям второй категории приведен ниже.

Результаты проверки условий соответствия требованиям к надежности теплоотпуска ПТЭ второй категории (таблица 7), исходя из заданного состава исходных данных (таблица 6) и принятой системе оценок (таблица 5), показывают, что при даже достаточно высоком значении вероятности безотказной работы оборудования ТЭЦ дефицит располагаемой мощности и наличии потерь тепловой энергии в ТС, при отказе одной (из семи) КУ, среднее время восстановления которой превышает 80 часов, приводит к снижению температуры воздуха в помещениях ПТЭ (в конце периода восстановления работоспособного состояния оборудования ТЭЦ), а так же относительной подачи теплоты (тепловой мощности) ТЭЦ, ниже значений, нормированных [1] и [2]. Отсюда следует очевидный вывод: надежность ТЭЦ по теплоотпуску ПТЭ второй категории не соответствует нормативным требованиям и качественно оценивается как «ненадежный» источник.

Для устранения этого несоответствия предлагается выполнить **два комплекса мероприятий**:

1) – устранить (снизить) дефицит располагаемой мощности, возникающий из-за потерь тепловой энергии в ТС;

2) – снизить среднее время восстановления отказывавшего оборудования (КУ) за счет: увеличения количества и повышения квалификации ремонтного персонала; оснащения ремонтных бригад современным оборудованием; оптимизацией циклов диагностирования, обслуживания и ремонта оборудования.

Представленный выше пример расчета ПН ИТ и результат оценки его надежности показывают, что разрабатываемый перечень мероприятий целиком и полностью зависит от объема и качества исходной информации. Поэтому процесс ее получения становится отдельной, важной и очень ответственной задачей.

Так в примере, отсутствие информации об отказах и восстановлениях оборудования ИТ, приводит к необходимости использования справочных, среднестатистических данных об интенсивностях отказов и временах восстановления, значения которых определяют в итоге результат оценки.

Ответственность за использование (неиспользование, а также предоставление или не предоставление) достоверных фактических исходных данных, обуславливает результаты оценивания и состав мероприятий, реализация которых влечет за собой с одной стороны – риски возникновения соответствующих аварийных событий, а с другой стороны – риски неоправданных финансовых затрат при некорректно принятых управленческих решениях.

Обоснование эффективности планируемых к реализации комплексов мероприятий выполняется по отклонениям значений ПН от допустимых (нормированных) диапазонов значений (таблица 9).

Таблица 9 – Отклонение значений показателей надежности теплоотпуска потребителям второй категории от нормированных диапазонов

Показатель	Условие	Значения	Отклонение
Среднее значение тепловой мощности ТЭЦ (фактически выданной ПТЭ второй категории с учетом отказов КУ ИТ и потерь тепловой мощности в ТС), Гкал/ч	$\bar{Q}_\phi^И \geq Q_{\text{доп}}^{\text{ПТЭИ}} (u_{23})$	201,5 < 225,86	24,36
Среднее значение времени восстановления после отказов оборудования (КУ) ТЭЦ, ч	$\bar{\tau}_B^И \leq \tau_{B\text{доп}}^И (u_{25})$	87,6 > 54	33,6
Ожидаемое значение фактического снижения относительной подачи теплоты (тепловой мощности) ТЭЦ	$\varphi_{\text{ав}\phi}^И \geq \varphi_{\text{ав}}^И (u_{27})$	0,78 < 0,872	0,102
Температура воздуха в помещениях ПТЭ второй категории в конце периода восстановления работоспособного состояния оборудования ТЭЦ, °С	$t_B \geq t_B^{\text{доп}} (u_{29})$	11,39 < 12	0,61

Так как в расчете  $t_B$  (19) используются значения  $\bar{\tau}_B^И$  и  $\varphi_{\text{ав}\phi}^И$ , то логично будет определить область их оптимальных значений, как аргументов функции (19), обеспечивающих соответствие значений  $t_B$  нормативным требованиям (т.е. не менее 12 °С). В таблице 10 и на рисунке 1 эта область значений выделена зеленым фоном полей таблицы и линиями зеленого цвета соответственно.

Таблица 10 – Температура воздуха в зданиях потребителей второй категории в конце периода восстановления работоспособного состояния оборудования источника тепловой энергии

Среднее время восстановления оборудования (КУ) ТЭЦ $\bar{\tau}_B^И$ , ч	Относительная подача теплоты (тепловой мощности) ТЭЦ потребителям второй категории $\varphi_{\text{ав}\phi}^И$ , %										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Температура воздуха в зданиях потребителей второй категории в конце периода восстановления работоспособного состояния оборудования ТЭЦ $t_B$ , °С										
20	5,54	6,99	8,43	9,88	11,33	12,77	14,22	15,66	17,11	18,55	20
30	-0,07	1,94	3,95	5,95	7,96	9,97	11,97	13,98	15,99	17,99	20
40	-4,82	-2,33	0,15	2,63	5,11	7,59	10,07	12,56	15,04	17,52	20
50	-8,84	-5,95	-3,07	-0,18	2,70	5,58	8,47	11,35	14,23	17,12	20
60	-12,24	-9,01	-5,79	-2,57	0,66	3,88	7,10	10,33	13,55	16,78	20
70	-15,12	-11,61	-8,09	-4,58	-1,07	2,44	5,95	9,46	12,98	16,49	20
80	-17,56	-13,80	-10,05	-6,29	-2,53	1,22	4,98	8,73	12,49	16,24	20
90	-19,62	-15,66	-11,70	-7,73	-3,77	0,19	4,15	8,11	12,08	16,04	20

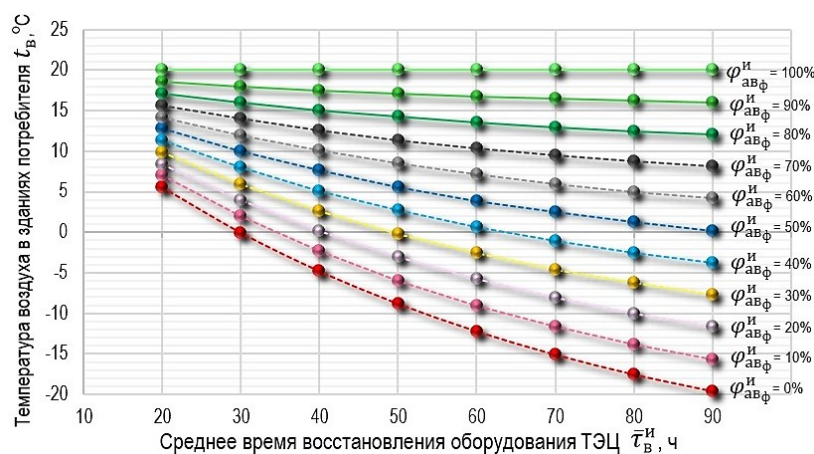


Рисунок 1 – Температура воздуха в зданиях в зависимости от среднего времени восстановления оборудования источника и относительной подачи теплоты потребителям второй категории

Область оптимальных значений функции  $t_b$  (19), показывает (таблица 10, рисунок 1), что даже при среднем времени восстановления оборудования ИТ, превышающем нормированное значение в 54 ч, температура воздуха в зданиях ПТЭ второй категории в конце периода восстановления работоспособного состояния оборудования ИТ, будет превышать нормированное [1] (п. 4.8) ограничение в 12 °С при снижении значений относительной подачи теплоты (тепловой мощности) до 80%.

Вместе с тем, наличие 25,56 % потерь тепловой энергии при транспорте через ТС, является основной причиной снижения тепловой мощности ИТ, фактически выдаваемой потребителям второй категории. Поэтому реализация первого комплекса мероприятий по устранению (снижению) дефицита располагаемой мощности, (возникающего из-за потерь тепловой энергии в ТС) снизит риски недопоставок тепловой энергии в аварийных ситуациях и тем самым обеспечит надежный теплоотпуск в соответствии с требованиями нормативных документов.

Для экономического обоснования предлагаемых к реализации мероприятий рекомендуется воспользоваться методиками, опубликованными в [16] или [17] (п. 13.7, с. 428), с соответствующей корректировкой критерия оценки эффективности. Упрощенный вариант обоснования (по сроку окупаемости планируемых мероприятий) следующий:

1. Комплекс мероприятий должен снизить потери тепловой мощности на:

$$Q_{\text{доп}}^{\text{ПТЭII}} - \bar{Q}_{\text{ф}} = 225,86 - 201,5 = 24,36 \text{ Гкал/ч.}$$

2. Продолжительность отопительного периода (по п. 8 примера расчета):

$$\tau_{\text{оп}} = 198 \text{ сут.} = 4752 \text{ ч/год.}$$

3. Экономия тепловой мощности при снижении потерь (за год):

$$E_{\text{год}} = 24,36 \cdot 4752 = 115758,72 \text{ Гкал/год.}$$

4. Тариф на тепловую энергию (с 1 июля по 31 декабря 2025 года, с учётом НДС, [15]):

$$C_{\text{T}} = 4167,04 \text{ руб./Гкал.}$$

5. Экономия за год (в рублях):

$$E_{\text{руб}} = E_{\text{год}} \cdot C_{\text{T}} = 115758,72 \cdot 4167,04 = 482,37 \text{ млн руб./год.}$$

6. Капитальные затраты (например: перекладка + замена изоляции + регулировка)<sup>1</sup>:

$$K_{\text{из}} = 7,5 \text{ млрд руб.}$$

7. Срок окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = K_{\text{из}} / E_{\text{руб}} = 7500 / 482,37 \approx 15,55 \text{ года } (\approx 186,6 \text{ мес.}).$$

Проверка эффективности реализации первого комплекса мероприятий выполняется в следующем порядке.

1. Среднее значение недопоставленной тепловой мощности и среднее значение тепловой мощности ТЭЦ фактически выданной ПТЭ второй категории с учетом отказов КУ ИТ и потерь тепловой мощности в ТС:

---

<sup>1</sup> Значение принято условно.

$$Q_{\text{пот}}^{\text{ТС}} = 85,765 - 24,36 = 61,4 \text{ Гкал/ч,}$$

$$\bar{Q}_{\text{ф}}^{\text{И}} = Q_{\text{ав}}^{\text{И}} - \bar{Q}_{\text{нед}}^{\text{И}} - Q_{\text{пот}}^{\text{ТС}} = 287,27 - 0,000073 - 61,4 = 225,865 \text{ Гкал/ч.}$$

2. Ожидаемое значение фактического снижения относительной подачи теплоты (тепловой мощности) ИТ:

$$\varphi_{\text{авф}}^{\text{И}} = \frac{\bar{Q}_{\text{ф}}^{\text{И}}}{Q_{\text{р}}^{\text{ПТЭИ}}} = \frac{225,865}{259,013} = 0,872.$$

3. Температура воздуха в помещениях ПТЭ в конце периода восстановления работоспособного состояния оборудования ИТ:

$$t_{\text{в}} = t_{\text{н}}^{\text{р}} + \frac{t_{\text{в}}^{\text{р}} - t_{\text{н}}^{\text{р}} - \varphi_{\text{авф}}^{\text{И}} \cdot (t_{\text{в}}^{\text{р}} - t_{\text{н}}^{\text{р}})}{e^{\left(\frac{\bar{t}_{\text{в}}^{\text{И}}}{\beta}\right)}} + \varphi_{\text{авф}}^{\text{И}} \cdot (t_{\text{в}}^{\text{р}} - t_{\text{н}}^{\text{р}}) = -31 + \frac{20 - (-31) - 0,872 \cdot (20 - (-31))}{2,71^{\left(\frac{87,6}{60}\right)}} + 0,872 \cdot (20 - (-31)) = 14,99 \text{ }^{\circ}\text{C,}$$

4. Проверка условий, определение значений функций оценивания и качественной оценки надежности теплоотпуска ИТ.

Результаты проверки приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты проверки условий соответствия требованиям к надежности теплоотпуска потребителям второй категории

Набор №	Условие (аргумент) (соответствие требованиям п. 4.8, 4.16 СП 89.13330.2016; п. 4.2, 5.5, 6.26 СП 124.13330.2012)					Функция
	$\bar{Q}_{\text{ф}}^{\text{И}} \geq Q_{\text{доп}}^{\text{ПТЭИ}} (u_{23})$	$\bar{t}_{\text{в}}^{\text{И}} \leq t_{\text{в,доп}}^{\text{И}} (u_{25})$	$\varphi_{\text{авф}}^{\text{И}} \geq \varphi_{\text{ав}}^{\text{И}} (u_{27})$	$t_{\text{в}} \geq t_{\text{в}}^{\text{доп}} (u_{29})$	$P_{\text{и}} \geq 0,97 (u_{30})$	$C_{\text{ИТ}}^{\text{И}}$
	Сравниваемые значения					
	225,865 > 225,86	87,6 > 54	0,872 = 0,872	14,99 > 12	0,999 > 0,97	
	Результат сравнения (значение аргументов)					Значение
9	1	0	1	1	1	0

Проверки условий соответствия требованиям к надежности теплоотпуска ПТЭ второй категории (таблица 11) подтверждает эффективность выполнения планируемого комплекса мероприятий по снижению потерь тепловой энергии в ТС. В целом, для обеспечения выполнения условий соответствия требованиям по надежному теплоотпуску от ИТ потребителям второй категории, рекомендуется снизить потери в ТС на 7,3 % (с 25,56% до 18,3%). Вместе с тем, остается одно условие, требования которого в соответствии с [1] и [2] не выполнено. Как было указано выше, если выполнить второй комплекс мероприятий по снижению среднего времени восстановления отказывавшего оборудования ТЭЦ, то ТЭЦ, будет оцениваться как «высоконадежный» источник тепловой энергии.

## Список литературы

- [1] СП 89.13330.2016 Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35-76.
- [2] СП 124.13330.2012 Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003.
- [3] Правила организации теплоснабжения в Российской Федерации. Постановление Правительства РФ от 8 августа 2012 года № 808 (с изменениями на 31 марта 2025 года).
- [4] Изменения, которые вносятся в акты Правительства Российской Федерации. Постановление Правительства РФ от 31 марта 2025 года № 408.
- [5] Сеннова Е.В., Смирнов А.В., Ионин А.А. и др. Надежность систем энергетики и их оборудования: Справочное издание. В 4 т. Т. 4: Надежность систем теплоснабжения / — Новосибирск: Наука, 2000. — 351 с..
- [6] Методические указания по анализу показателей, используемых для оценки надежности систем теплоснабжения (приказ Министерства регионального развития РФ от 26 июля 2013 г. № 310).
- [7] Методические указания по разработке схем теплоснабжения (приказ Минэнерго РФ от 5 марта 2019 года № 212).
- [8] Ионин А.А. Надежность систем тепловых сетей. - М.: Стройиздат, 1989. - 268 с.: ил. - (Надежность и качество).-ISBN 5-274-00518-7.
- [9] САНПИН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Постановление № 2 от 28 января 2021 г. ФСН.
- [10] ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
- [11] ГОСТ Р 50831—2025 Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования.
- [12] ГОСТ Р 55173—2012 Установки котельные. Общие технические требования.
- [13] Непомнящий В.А. Надежность оборудования энергосистем. — М.; журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», 2013. — 196 с., ил..
- [14] СТО НОСТРОЙ 6.1-2020 Здания и сооружения. Определение фактического энергопотребления вводимых в эксплуатацию зданий. Оценка соответствия требованиям энергетической эффективности.
- [15] <http://www.biradm.ru/files/jkh/ОМ%20Биробиджан%202019.pdf>.
- [16] Кирюхин С.Н., Шиманская А.О., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Анализ изменения средневзвешенного периода эксплуатации теплопроводов в зависимости от объемов реконструкции тепловых сетей Энергосбережение. 2024. № 2. С. 34-37..
- [17] Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. Учебник для вузов. — 7-е изд., стереот. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 472 с.: ил..

[18] СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99 (приказ Министерства регионального развития РФ от 30 июня 2012 г. № 275).