

УДК 621.56+330.322.55:62-711

Метод расчета срока окупаемости естественного охлаждения (фрикулинга)

В.Н. МАСЛАКОВ, maslakov_v@olex.ru
начальник отдела поддержки продаж ООО «ОЛЕКС ХОЛДИНГ-М»

Для охлаждения жидкости используют холодильную машину – чиллер. Основным потребителем электрической энергии является компрессор чиллера. Для снижения энергопотребления применяют схемы с естественным охлаждением – фрикулингом. Снижение энергопотребления обусловлено частичным или полным простоем компрессора в момент работы оборудования при естественном охлаждении. В связи с тем что экономия средств достигается за счет снижения эксплуатационных затрат, но при увеличении капитальных затрат, одним из критериев принятия решения является срок окупаемости.

В статье дана методика расчета срока окупаемости применения естественного охлаждения с целью снижения энергопотребления чиллера. Используя предложенную методику, заказчик может проанализировать инвестиционную привлекательность применения фрикулинга, а подрядчик может обосновать, почему необходимо использовать то или иное схемное решение фрикулинга.

Ключевые слова: чиллер, естественное охлаждение, фрикулинг, срок окупаемости, энергопотребление, снижение энергозатрат.

METHOD OF CALCULATION OF A PAYBACK PERIOD OF NATURAL COOLING (FREE COOLING)

V.N. MASLAKOV, maslakov_v@olex.ru
Chief of Sales Support Department ООО “OLEKS HOLDING-M”

To cool liquid a refrigerating machine – chiller is used. The chiller compressor is the main consumer of electric power. To reduce energy consumption the schemes with natural cooling – free cooling are used. Energy consumption reducing is caused by partial or full dead time of the compressor when the equipment is operating at natural cooling. Reducing operating costs allows saving means, but when capital costs are increased, the payback period is one of the criteria to take a decision.

The paper presents the method of calculation of the payback period of natural cooling application in order to reduce the chiller power consumption. Using a method offered the customer may analyze investment profit of free cooling, and a contractor may reason the application of one or another circuitry of free cooling.

Keywords: chiller, natural cooling, free cooling, payback period, power consumption, power costs reducing.

В общем случае срок окупаемости фрикулинга τ рассчитывается как отношение капитальных затрат $KЗ$ к годовой экономии эксплуатационных затрат $\Delta ЭЗ$. Капитальные затраты включают стоимость оборудования для работы фрикулинга $Ц_{об}$, хладоносителя $Ц_{хн}$ и монтажа $Ц_{монтаж}$.

$$\tau = \frac{KЗ}{\Delta ЭЗ} = \frac{Ц_{об} + Ц_{хн} + Ц_{монтаж}}{\Delta ЭЗ} \quad (1)$$

Экономия эксплуатационных затрат происходит в основном за счет снижения потребления электро-

энергии компрессорным агрегатом, так как холодоснабжение осуществляется путем использования естественного холода наружного воздуха. Таким образом, экономию эксплуатационных затрат можно представить как энергозатраты компрессорного агрегата за период работы фрикулинга за вычетом энергозатрат оборудования фрикулинга (вентиляторов и насосов).

$$\Delta ЭЗ = S_{эз} \Delta W_{эз} = S_{эз} (W_{ка} - W_{фр}), \quad (2)$$

где $S_{эз}$ – тариф на электроэнергию;

$W_{ка}$ и $W_{фр}$ – энергопотребление компрессорного агрегата и оборудования фрикулинга соответственно за время работы фрикулинга $\tau_{фр}$.

Использование естественного холода возможно, если температура воздуха t_B ниже температуры воды t_w , приходящей от потребителей холода.

$$\Delta W_{э\Delta} = W_{ка} - W_{фр} = \Sigma[(N_{ка_i} - N_{фр_i})\Delta\tau_i], \quad (3)$$

где $N_{ка_i}$ и $N_{фр_i}$ – мощность электропотребления компрессорного агрегата и оборудования фрикулинга за время $\Delta\tau_i$.

Просуммировать необходимо мощности по всем временным интервалам, когда используется холод наружного воздуха, т.е. выполняется условие $t_B < t_w$.

Наиболее часто встречающиеся схемы с использованием естественного холода включают промежуточное рабочее вещество – хладоноситель, а также теплообменники «хладоноситель–воздух» и «хладоноситель–вода». В этом случае процесс холодоснабжения происходит следующим образом: воздух в теплообменнике (сухой градирне) охлаждает хладоноситель, который, в свою очередь, в теплообменнике «хладоноситель–вода» охлаждает воду.

Чем ниже температура наружного воздуха, тем больше холодопроизводительность сухой градирни. Так как потребность в холоде определяется технологическим процессом, то возможны два варианта работы.

1. С аккумуляцией холода, когда весь холод, произведенный сухой градирней, полезно используется. В этом случае оборудование фрикулинга загружено постоянно.

2. Без аккумуляции холода, когда холодопроизводительность сухой градирни должна быть равна тепловой нагрузке. В этом случае осуществляется регулирование либо частоты вращения, либо количества работающих вентиляторов сухой градирни.

Следовательно, для правильного расчета энергопотребления необходимо учитывать влияние температуры наружного воздуха на энергопотребление оборудования.

Температура наружного воздуха непостоянна, и продолжительность времени в году, когда она не превышает какого-то значения, например 0°C , год от года меняется. Но если провести наблюдения за температурой воздуха на большом отрезке времени, исчисляемом десятилетиями, то на основании полученных средних данных можно построить диаграмму температуры воздуха.

Диаграмма, приведенная на рис. 1, была получена при обработке данных о температуре воздуха в Москве, зафиксированной метеостанцией за период с 1966 по 2010 г. Она отражает средний за период процент времени в году γ , когда наблюдается данная наружная температура t_B .

Пользоваться этой диаграммой удобно, если необходимо узнать, сколько времени в году температура воздуха ниже, например, -10°C . В этом случае

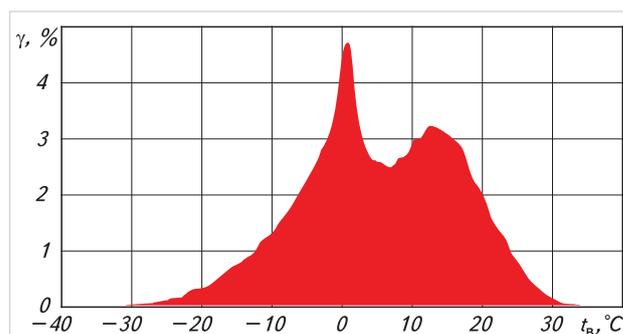


Рис. 1. Диаграмма температур наружного воздуха в Москве (по данным за 1966–2010 гг.)

нужно просуммировать все значения γ , при которых $t_B < -10^\circ\text{C}$.

Воспользуемся этой диаграммой для расчета энергопотребления компрессорного агрегата и оборудования фрикулинга. Тогда выражение (3) можно записать в виде

$$\Delta W_{э\Delta} = W_{ка} - W_{фр} = \int_{t_{\min}}^{t_{\text{опт}}} \left(\frac{Q_x(t_B)}{COP_{ка}} - N_{фр}(t_B) \right) \gamma(t_B) dt_B, \quad (4)$$

где $Q_x(t_B)$ – холодопроизводительность агрегата; $COP_{ка}$ – холодильный коэффициент компрессорного агрегата.

Экономия максимальна, если фрикулинг работает при температуре ниже температуры $t_{\text{опт}}$, которая определяется из условия, что энергопотребление оборудования фрикулинга $N_{фр}$ меньше, чем энергопотребление компрессорного агрегата $N_{ка}$, т.е.

$$\frac{Q_x(t_B)}{COP_{ка}} - N_{фр}(t_B) \geq 0. \quad (5)$$

Таким образом, в общем виде срок окупаемости

$$\tau = \frac{KЗ}{S_{э\Delta} \Delta W_{э\Delta}} = \frac{KЗ}{S_{э\Delta} \left(\frac{Q_{x \text{ ном}}}{COP_{ка}} \right) k_{з \text{ фр}}} = \left(\frac{KЗ}{Q_{x \text{ ном}}} \right) \frac{COP_{ка}}{S_{э\Delta} k_{з \text{ фр}}}, \quad (6)$$

где $\frac{Q_{x \text{ ном}}}{COP_{ка}}$ – энергопотребление компрессорного

агрегата на номинальном режиме, для которого рассчитывается оборудование фрикулинга;

$\frac{KЗ}{Q_{x \text{ ном}}}$ – удельные капитальные затраты (на 1 кВт

холодопроизводительности);

$k_{з \text{ фр}}$ – коэффициент загрузки фрикулинга,

$$k_{з \text{ фр}} = \int_{t_{\min}}^{t_{\text{опт}}} \left(\frac{Q_x(t_B)}{Q_{x \text{ ном}}} - \frac{N_{фр}(t_B) \cdot COP_{ка}}{Q_{x \text{ ном}}} \right) \gamma(t_B) dt_B = \int_{t_{\min}}^{t_{\text{опт}}} \left(q(t_B) - \frac{COP_{ка}}{COP_{фр}(t_B)} \right) \gamma(t_B) dt_B, \quad (7)$$

где $q(t_B) = \frac{Q_x(t_B)}{Q_{x \text{ ном}}}$; $COP_{фр}(t_B) = \frac{Q_{x \text{ ном}}}{N_{фр}(t_B)}$.

Уравнение (6) можно толковать следующим образом: срок окупаемости есть отношение капитальных затрат к экономии электроэнергии на режиме номинальной холодопроизводительности в течение времени, характеризуемого коэффициентом загрузки фрикулинга $k_{з\text{ фр}}$.

Например, если удельные капитальные затраты

$$\frac{KЗ}{Q_{x\text{ ном}}} = 100 \text{ евро/кВт}, \text{ холодильный коэффициент}$$

компрессорного агрегата $COP_{ка} = 5$, тариф на электроэнергию $S_{э} = 0,1 \text{ евро/(кВт}\cdot\text{ч)}$, а коэффициент загрузки $k_{з\text{ фр}} = 10\%$, то срок окупаемости $\tau = 100 \cdot 5 / (0,1 \cdot 0,1) = 50\,000 \text{ ч} = 5,7 \text{ лет}$.

Для определения коэффициента загрузки фрикулинга необходимо учесть особенности технологии производства, работы компрессорного агрегата и оборудования фрикулинга. Для простоты расчета будем рассматривать технологию, при которой режим работы технологического оборудования не меняется, т.е. постоянны потребность в холоде $Q_{x\text{ ном}}$, расход охлаждаемой чиллером воды, а также температуры воды на входе и выходе.

Рассмотрим, как изменяется холодопроизводительность в режиме фрикулинга при снижении температуры воздуха при работе по схеме воздух–хладагент – вода. В этом случае температура кипения в испарителе равна температуре конденсации в конденсаторе.

Исходя из термодинамики работы противоточного теплообменного аппарата, если расходы рабочих веществ не изменяются, то разность температур по воде пропорциональна максимальному температурному напору – разности между температурой воды, поступающей от потребителей, и температурой наружного воздуха – и не зависит от типа промежуточного рабочего вещества (хладоноситель или хладагент). Это значит, что при снижении температуры воздуха холодопроизводительность оборудования фрикулинга увеличивается линейно. При равенстве температуры воздуха и воды от потребителей максимальный температурный напор равен нулю. Поэтому линия холодопроизводительности начинается с температуры воды от потребителя t_w и возрастает по мере снижения температуры воздуха, проходя при этом через точку номинального режима $t_{в\text{ ном}}$ (рис. 2).

Тогда при работе с аккумуляцией холода

$$q(t_B) = \frac{t_w - t_B}{t_w - t_{в\text{ ном}}} = \frac{t_w - t_B}{\Delta t_{\text{ном}}}, \quad (8)$$

$$COP_{\text{фр}} = \frac{Q_{x\text{ ном}}}{N_{\text{фр}}} = \text{const}; \quad (9)$$

$$k_{з\text{ фр max}} = \int_{t_{\text{мин}}}^{t_{\text{опт}}} \frac{t_w - t_B}{\Delta t_{\text{ном}}} \gamma(t_B) dt - \frac{COP_{ка}}{COP_{\text{фр}}} \int_{t_{\text{мин}}}^{t_{\text{опт}}} \gamma(t_B) dt_B = \left(\frac{t_w - t_{\text{ср}}(t_{\text{опт}})}{\Delta t_{\text{ном}}} - \frac{COP_{ка}}{COP_{\text{фр}}} \right) \Gamma(t_{\text{опт}}). \quad (10)$$

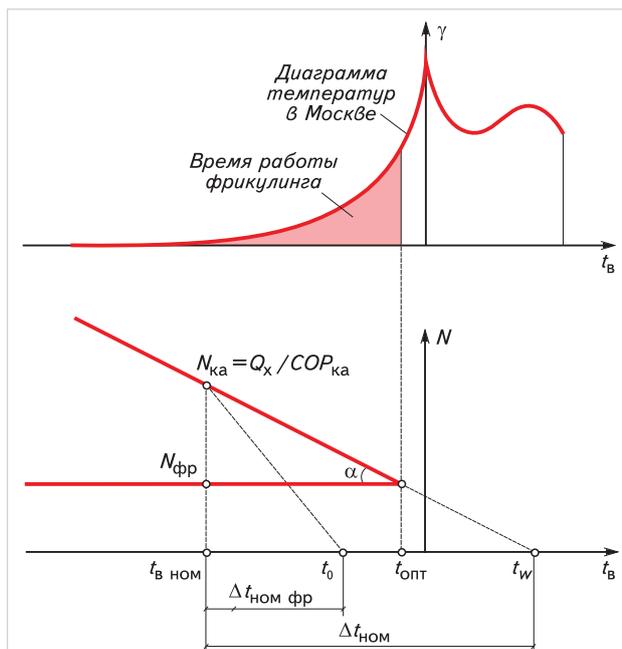


Рис. 2. Энергозатраты на компрессорный агрегат и на фрикулинг при работе с аккумуляцией холода

Здесь

$$\Gamma(t_{\text{опт}}) = \int_{t_{\text{мин}}}^{t_{\text{опт}}} \gamma(t_B) dt_B; \quad (11)$$

$$t_{\text{ср}}(t_{\text{опт}}) = \frac{\int_{t_{\text{мин}}}^{t_{\text{опт}}} \gamma(t_B) dt_B}{\Gamma(t_{\text{опт}})}. \quad (12)$$

Значение оптимальной температуры, с которой начинается работа в режиме фрикулинга, определяется следующим образом:

$$t_{\text{опт}} = t_w - \Delta t_{\text{ном}} \frac{COP_{ка}}{COP_{\text{фр}}}. \quad (13)$$

Коэффициент загрузки фрикулинга для схемы с аккумуляцией холода – максимально возможный, поэтому срок окупаемости фрикулинга будет минимальный.

Для схемы без аккумуляции холодопроизводительность сначала возрастает, а затем, начиная с номинальной температуры воздуха, остается постоянной. Энергопотребление оборудования фрикулинга $N_{\text{фр}}$ сначала постоянно, а затем снижается (рис. 3). Для точного расчета коэффициента загрузки необходимо располагать зависимостью снижения энергопотребления.

С целью упрощения анализа можно рассчитать коэффициент загрузки для режима, в котором энергопотребление оборудования фрикулинга постоянно в течение всей работы (рис. 4). В этом случае коэффициент загрузки будет минимально возможным и рассчитывается как

$$k_{з\text{ фр min}} = k_{з\text{ фр max}} - \Delta k_{з\text{ фр}}, \quad (14)$$

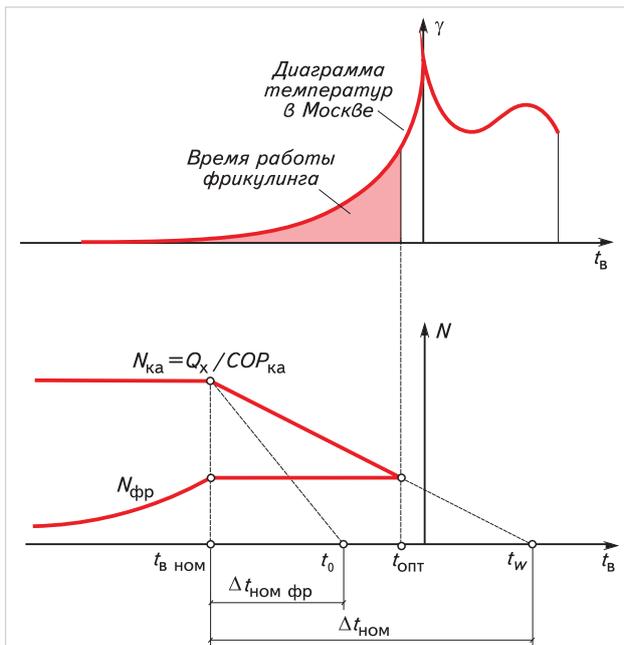


Рис. 3. Энергозатраты на компрессорный агрегат и на фрикулинг при работе без аккумуляции холода

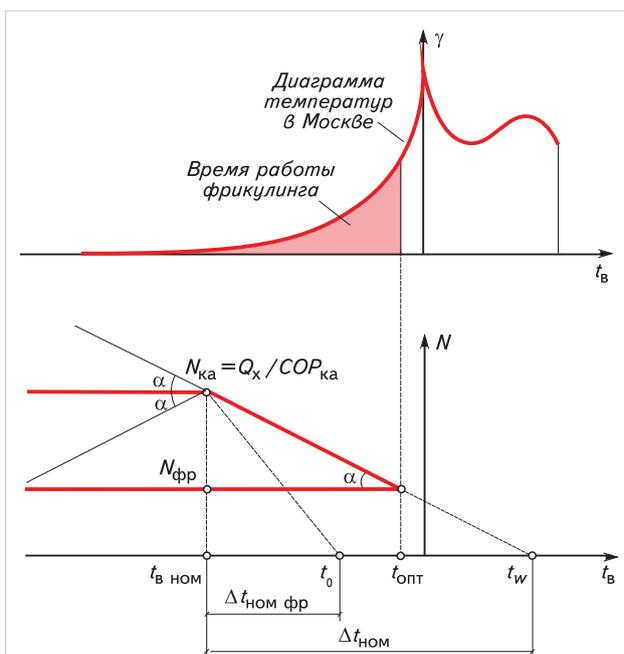


Рис. 4. Энергозатраты при постоянном энергопотреблении оборудования фрикулинга

$$\Delta k_{з\text{ фр}} = \Gamma(t_{в\text{ ном}}) \frac{t_{в\text{ ном}} - t_{ср}(t_{в\text{ ном}})}{\Delta t_{ном}} \quad (15)$$

Например, для температуры воздуха на номинальном режиме $t_{в\text{ ном}} = -18^\circ\text{C}$ и номинальном температурном напоре $\Delta t_{ном} = 25^\circ\text{C}$:

$$\Gamma(-18^\circ\text{C}) = 2,18\%$$

$$t_{ср}(-18^\circ\text{C}) = -21,8^\circ\text{C};$$

$$\Delta k_{з\text{ фр}} = 2,18 \frac{-18 - (-21,8)}{25} = 0,33\%.$$

Чем меньше температура воздуха на номинальном режиме, тем меньше отличие $k_{з\text{ фр min}}$ от $k_{з\text{ фр max}}$. Следовательно, и срок окупаемости для режима с регулированием энергопотребления оборудования фрикулинга будет мало отличаться от минимального срока окупаемости.

Схемы работы оборудования фрикулинга

Вариант 1. Вода от потребителей предварительно охлаждается в теплообменнике хладоносителем до минимально возможной температуры. После охлаждения поступает в испаритель холодильной машины. Контур хладоносителя независимый. Режим работы фрикулинга соответствует рис. 3.

Вариант 2. Вода от потребителей предварительно охлаждается в испарителе хладагентом до минимально возможной температуры. После охлаждения поступает в испаритель холодильной машины или в секцию аккумуляции льда. Контур хладагента независимый. Режим работы фрикулинга соответствует рис. 3.

Вариант 3. В существующий аммиачный контур холодильной машины на линии возврата парожидкостной смеси устанавливаются конденсаторы, в которых пар конденсируется после сепарации жидкой фазы. Сконденсированная жидкость сливается непосредственно в циркуляционный ресивер. Циркуляция хладагента в контуре с дополнительным конденсатором осуществляется за счет работы насосов. Данный режим работы отличается от предыдущих двух тем, что контуры фрикулинга и холодильной машины зависимы.

Рассмотрим этот вариант подробнее (рис. 5).

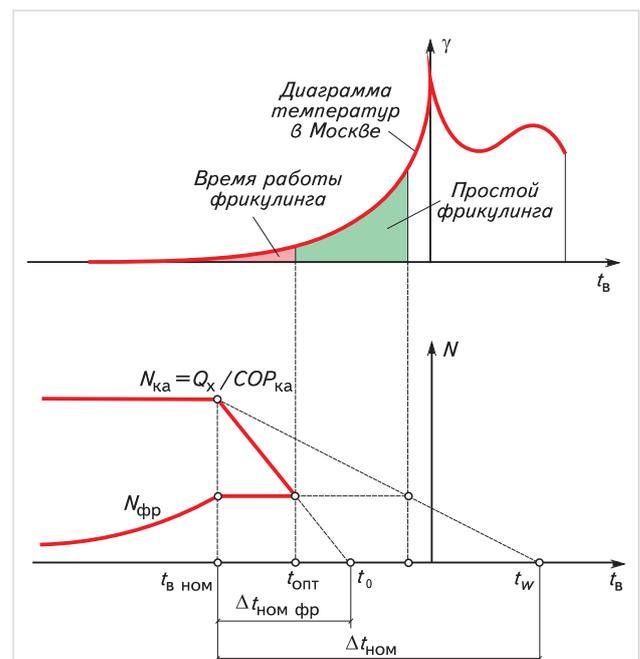


Рис. 5. Энергозатраты при взаимозависимости контуров холодильной машины и фрикулинга

Так как температура конденсации примерно равна температуре кипения (отличается на величину гидравлических потерь в трубопроводе), то использование естественного холода возможно, начиная с температуры воздуха ниже температуры кипения t_0 . Оптимальная температура начала работы фрикулинга будет еще ниже, так как необходимо учесть энергопотребление вентиляторов конденсатора. Из рис. 5 видно, что в связи с более низкой температурой начала работы фрикулинга время работы оборудования будет меньше по сравнению с вариантом 2 (см. рис. 3). Простой оборудования фрикулинга (зеленая область на рис. 5) приводит к снижению коэффициента загрузки фрикулинга и к уменьшению экономии энергозатрат.

С другой стороны, отсутствие испарителей приводит к снижению капитальных затрат по сравнению с вариантом 2. Таким образом, в выражении (6) уменьшается как числитель, так и знаменатель. Поэтому ответить на вопрос, снизится или возрастет срок окупаемости в варианте 3 по сравнению с вариантом 2, не представляется возможным без дополнительных расчетов.

Выводы

1. Экономия максимальна, если фрикулинг работает при температуре ниже t_{opt} , которая определяется из условия, что энергопотребление оборудования фрикулинга не должно превышать энергопотребление компрессора. В первом приближении оптимальную температуру можно определить как

$$t_{opt} = t_w - (t_w - t_{в\text{ ном}}) \frac{COP_{ка}}{COP_{фр}}$$

2. Срок окупаемости минимален, если фрикулинг работает при температурах воздуха вплоть до t_{opt} .

3. Срок окупаемости можно определить по формуле

$$\tau = \left(\frac{KЗ}{Q_{х\text{ ном}}} \right) \frac{COP_{ка}}{S_{эз} k_3 \text{ фр}}$$

4. Срок окупаемости фрикулинга снижается при:

- уменьшении холодильного коэффициента компрессорного агрегата $COP_{ка}$ (работа зимой на повышенной температуре конденсации): компрессор потребляет больше электроэнергии, поэтому увели-

чивается потенциальная экономия энергозатрат при использовании естественного холода;

- увеличении тарифа на электроэнергию $S_{эз}$: экономия энергозатрат возрастает;

- увеличении коэффициента загрузки оборудования – в районах с холодным климатом, а также при работе по последовательной схеме, когда предварительное охлаждение происходит в теплообменнике фрикулинга, а испарители холодильной машины используются в качестве доводчика.

5. Если расчетный срок окупаемости получается низким (1–2 года), целесообразнее задаваться таким временным интервалом, как «жизненный цикл работы оборудования» – 3–5 лет. А в качестве критерия отбора технического решения использовать минимальные эксплуатационные затраты на этом интервале времени при условии, что срок окупаемости не превышает «жизненный цикл». В этом случае эффективность работы оборудования и экономия будут максимальными.

6. Если отсутствуют климатические данные, чтобы построить диаграмму температур, то для оценки сроков окупаемости можно воспользоваться СНиП 23-01-99* «Строительная климатология». В этом СНиПе для Москвы приводятся данные по продолжительности и средней температуре для периодов со среднесуточной температурой до 0,8 и 10 °С (см. таблицу).

Среднесуточная температура периода, °С	Продолжительность периода, сут	Средняя температура, °С
≤0	145	–6,5
≤8	214	–3,1
≤10	231	–2,2

В этом случае для расчета срока окупаемости по (10) при температуре начала работы оборудования вблизи, например, 0 °С необходимо использовать

$$t_{opt} = 0 \text{ °С}; \Gamma(0 \text{ °С}) = 145/365 = 40 \text{ \%};$$

$$t_{ср}(0 \text{ °С}) = -6,5 \text{ °С}.$$

Примечание. Необходимо помнить, что температуры в данном СНиПе рассчитаны за период с 1966 по 1980 г. и температуры последних десятилетий не учтены.