



УДК 697.9

В.А. Бройда

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ВОЗДУХА, УДАЛЯЕМОГО СИСТЕМАМИ ВЕНТИЛЯЦИИ

Системы утилизации теплоты удаляемого воздуха (СУТ УВ) с промежуточным теплоносителем, а также основанные на использовании пластинчатых рекуператоров, вращающихся регенераторов, тепловых трубок (термосифонов), находят широкое применение в зарубежной и отечественной практике. Достаточно суровый климат России делает такую утилизацию энергетически оправданной. В то же время, относительно низкие, по сравнению с европейскими и мировыми, цены на тепловую и электроэнергию несколько тормозят внедрение СУТ УВ. Целесообразность использования СУТ УВ решается на основе энергетической и экономической оценки.

В работе [1] предлагается выполнять оценку мероприятий по энергосбережению, используя бездисконтный срок окупаемости T_o (год) и характеристики, учитывающие норму дисконта r .

$$T_o = \Delta K / \Delta \mathcal{E}, \quad (1)$$

где ΔK - инвестиции в энергосберегающие мероприятия, руб;

$\Delta \mathcal{E}$ - ежегодный доход от внедрения таких мероприятий в течение всего срока эксплуатации, руб/год;

r - расчетная норма дисконта, в соответствии с рекомендациями [1] современному состоянию отечественной экономики соответствует $r=0,10 \div 0,12$.

По данным, приведенным в работе [1], при сроке эксплуатации 20 лет и $r=0,1$ в случае, если $T_o \leq 1,3$ года, инвестиции в мероприятия по энергосбережению являются целесообразными. В случае если $1,3 < T_o \leq 8,5$ лет, такие мероприятия перспективны с учетом наращивания получаемых доходов. При $T_o > 8,5$ лет подобные инвестиции экономически мало оправданы.

Приближенная оценка экономии тепловой энергии за счет использования СУТ УВ Q (кВт-ч/год) может быть выполнена по формуле:

$$Q = L \cdot c \cdot \rho \cdot (t_B - t_{CP}) \cdot E \cdot \tau / 3600, \quad (2)$$

где L - расход вентиляционного воздуха, м³/ч;

c - теплоемкость воздуха, =1,005 кДж/(кг·°C);

ρ - плотность воздуха, в данных расчетах

$\rho = 1,2$ кг/м³;

t_B, t_{CP} - соответственно, температура воздуха в помещении и средняя температура наружного

воздуха за отопительный период [2], °C;

E - эффективность конкретного теплоутилизатора;

τ - продолжительность работы вентиляционной установки с СУТ УВ в течение отопительного периода, час.

Тогда экономия средств за счет применения СУТ УВ определится выражением:

$$\Delta \mathcal{E} = Q \cdot c_T, \quad (3)$$

где c_T - стоимость тепловой энергии основного источника, энергия которого сберегается (теплосеть, котельная и т.д.), руб/кВт-ч.

Зная величину $\Delta \mathcal{E}$ и соответствующие величины сроков окупаемости T_o , несложно определить граничные значения экономически оправданных инвестиций в СУТ УВ.

При таком упрощенном подходе не учитываются дополнительные затраты электроэнергии, связанные с существенным повышением аэродинамического сопротивления каналов приточного и удаляемого воздуха. Не учитывается длительность всего периода теплоутилизации, которая обычно больше длительности отопительного периода, так как определяется более высокими температурными границами, близкими к температуре воздуха в помещении. Не учитываются также затраты тепловой энергии на мероприятия по защите от замораживания теплообменных поверхностей теплоутилизатора, находящихся в потоке удаляемого воздуха при отрицательных температурах. Наконец, не учитывается некоторое снижение эффективности использования теплоутилизации, связанное с суточными колебаниями температуры наружного воздуха.

В данной работе выполняется энергетическая и экономическая оценка эффективности СУТ УВ с учетом вышеназванных факторов.

Применение теплоутилизаторов УВ любого типа приводит к возрастанию аэродинамического сопротивления каналов приточного и удаляемого воздуха. Соответственно увеличиваются затраты мощности вентиляторов на перемещение приточного и удаляемого воздуха, растут денежные затраты на электроэнергию. Причем подобные повышенные затраты происходят круглогодично, а не только в период действия теплоутилизатора.

Итак, если при равенстве расходов приточного и удаляемого воздуха суммарное повышение сопротивления воздушного тракта составит ΔP (Па),



то ему соответствует дополнительно расходуемая электрическая мощность вентиляторов ΔN (кВт)

$$\Delta N = \Delta P \cdot L / (3600 \cdot 1000 \cdot КПД), \quad (4)$$

связанный с ней дополнительный расход электроэнергии ΔE_L (кВт-час/год)

$$\Delta E_L = \Delta N \cdot (X_2 - X_1) \cdot \frac{n}{7} \cdot 365 \quad (5)$$

и повышение денежных затрат на электроэнергию ΔE_3 (руб/год)

$$\Delta E_3 = \Delta E_L \cdot c_E, \quad (6)$$

где КПД - коэффициент полезного действия вентиляционных агрегатов;

X_1, X_2 - соответственно, ежедневное время начала и окончания работы вентиляционной системы с СУТ УВ, час;

n - число рабочих дней использования вентиляционной системы с СУТ УВ в неделю;

c_E - стоимость электроэнергии, руб/кВт-час.

Существенным фактором для оценки эффективности утилизации теплоты являются климатические условия, сочетания которых, в принципе, могут быть заданы различными способами. Используя данные [2], ход годового изменения температуры наружного воздуха t_H можно описать выражением:

$$t_H = t_G + A \cdot \text{Cos}(z), \quad (7)$$

где t_G , A - соответственно, среднегодовое значение температуры t_H и амплитуда ее отклонения от среднегодового значения, °С;

z - безразмерная временная переменная, $z = Z \cdot 2\pi / 365$;

Z - время, отсчитываемое от годового максимума температур, сут.

Используя среднюю температуру отопительного периода t_{CP} (периода с температурой наружного воздуха ниже 8 °С) и продолжительность отопительного периода ΔZ_{OT} (сут), приведенные в [2], можно вычислить значения A и по t_G формулам:

$$A = \frac{8 - t_{CP}}{\text{Sin}(\Delta z_{OT} / 2) / (\Delta z_{OT} / 2) - \text{Cos}(\Delta z_{OT} / 2)} \quad (8)$$

$$t_G = t_{OT} + A \cdot \text{Cos}(\Delta z_{OT} / 2) \quad (9)$$

Продолжительность отопительного периода в безразмерных величинах определяется выражением:

$$\Delta z_{OT} = \Delta Z_{OT} \cdot 2\pi / 365 \quad (10)$$

При работе системы вентиляции с СУТ УВ только часть суток, обычно это светлое время суток, характеризующееся более высокой температурой наружного воздуха, величина получаемой экономии затрат на тепловую энергию будет несколько ниже рассчитанной по среднесуточной температуре.

Суточное отклонение температуры также можно описать гармоническими колебаниями в пределах суток. Величину амплитуды суточного отклонения температуры A_C можно получить из [2 и др.]. Тогда среднесуточную добавку Δt к изменению температуры t_H , вносимую суточными колебаниями, в зависимости от времени начала X_1 и окончания X_2 работы СУТ УВ, можно выразить в виде:

$$\Delta t = -Ac \frac{\int_{x_1}^{x_2} \text{Cos}(x) dx}{2\pi} = Ac \cdot (\text{Sin}(x_1) - \text{Sin}(x_2)) / 2\pi, \quad (11)$$

где x - безразмерная временная переменная, отражающая суточный ход времени, $x = X \cdot 2\pi / 24$; X - время суток, ч.

С учетом выражения (11) изменение температуры наружного воздуха выразится формулой:

$$t_H = t_G + A \cdot \text{Cos}(z) + \Delta t = t_G + A \cdot \text{Cos}(z) + Ac \cdot (\text{Sin}(x_1) - \text{Sin}(x_2)) / 2\pi \quad (12)$$

Временные рамки использования СУТ УВ - периода с температурой наружного воздуха ниже t_{GP} (t_{GP} на несколько градусов ниже t_B) - в безразмерных величинах выразятся формулами:

$$z_1 = \text{arcCos}((t_{GP} - t_G) / A) \quad (13)$$

$$z_2 = 2\pi - z_1 \quad (14)$$

Таким образом, годовая экономия тепловой энергии от применения СУТ УВ Q_V (кВт-час/год), без учета затрат тепловой энергии на размораживание образующейся наледи, определится формулой:

$$Q_V = \frac{365 \cdot L \cdot \rho \cdot c \cdot (X_2 - X_1) \cdot n \cdot E}{2\pi \cdot 7 \cdot 3600} \int_{z_1}^{z_2} (t_B - t_H) dz = \frac{365 \cdot L \cdot \rho \cdot c \cdot (X_2 - X_1) \cdot n \cdot E}{2\pi \cdot 7 \cdot 3600} \cdot \{ [t_H - t_G - A_C \cdot (\text{Sin}(x_1) - \text{Sin}(x_2))] \cdot / 2\pi \cdot (z_2 - z_1) + A \cdot (\text{Sin}(z_1) - \text{Sin}(z_2)) \} \quad (15)$$

Оценить затраты тепловой энергии на оттаивание образующейся наледи можно, приближенно определив количество намораживаемого льда G_L (кг/ч). Будем полагать, что среднее значение



Таблица

Климат. условия: $t_{CP}, ^\circ C$ $\Delta Z_{OT},$ сут $A_c, ^\circ C.$	Продолж. раб. времени час.	Утилизируемая теплота $Q_y,$ кВт-ч в год. Затраты теплоты на размораж., $Q_d,$ кВт-ч в год	Экономия теплоты, $Q_y - Q_d,$ кВт-ч в год. Доп. затраты электроэн., $\Delta E_d,$ кВт-ч в год	Годовая экономия средств, $\Delta \mathcal{E},$ руб/год.	Инвестиции при $T_o=1,3$ года, руб. Инвестиции при $T_o=8,5$ года, руб.
0 170 0	10	65331 0	65331 2228	19078	24801 162160
0 170 4	10	60315 0	60315 2228	17322	22519 147239
0 170 4	24	156794 0	156794 5348	45768	59522 389184
-5 215 0	10	101085 2510	98575 2228	30713	39927 261061
* -5 215 0	10	94666 2510	92156 2228	28466	37006 241961
-5 215 4	10	95089 2299	92790 2228	28688	37295 243850
-5 215 4	24	242605 6025	236580 5348	73711	95825 626548
-10 230 0	10	128573 3324	125249 2228	40049	52064 340418
-10 230 5	10	120895 3133	117762 2228	37429	48657 318043
-10 230 5	24	308576 7977	300599 5348	96188	124953 817003

Примечание: Вариант, помеченный звездочкой, отличается от предыдущего тем, что его соответствующие величины рассчитаны в пределах отопительного периода ΔZ_{OT} .



влажностердания внутреннего воздуха за период использования теплоутилизации составляет d_B (кг/кг), тогда

$$G_L = L \cdot r \cdot d_B \quad (16)$$

Образование наледи происходит при условии, что температура удаляемого воздуха после теплоутилизатора t_{YT} ниже 0°C .

Величину t_{YT} можно приближенно определить выражением:

$$t_{YT} = t_B - (t_B - t_H) \cdot E \quad (17)$$

Затраты тепловой энергии на нагревание и оттаивание намораживаемого льда Q_L (кВт-час/год) определяются формулой:

$$Q_L = G_L \cdot (X_2 - X_1) \cdot 365 \cdot n / (2p \cdot 7 \cdot 3600) \cdot \int_{z_1}^{z_2} (c_L \cdot t_{YT} + r_L) \cdot dz, \quad (18)$$

при условии

$$t_{YT} < 0^\circ\text{C} \quad (19)$$

Величины теплоемкости и теплоты плавления льда, соответственно, равны:

$$c_L = 2,05 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)} \text{ и } r_L = -333,4 \text{ кДж/кг.}$$

Вычисление ежегодного дохода от внедрения СУТ УВ выполняется по формуле:

$$\Delta \mathcal{E} = (Q_V - Q_L) \cdot c_T - \Delta E z \quad (20)$$

Задавая норму дисконта и соответствующие предельные значения сроков окупаемости, можно определять экономически оправданные величины инвестиций в СУТ УВ.

Приведенные выше зависимости были реализованы в виде компьютерной программы. В таблице представлены данные расчета для 3-х условных климатических районов, отличающихся суровостью климата. Расчеты выполнены для 10-часового интервала рабочего времени и для круглосуточного режима работы. Представлены варианты без- и с учетом амплитуды суточных колебаний температуры. Для сравнения представлен вариант с характеристиками, рассчитанными в пределах отопительного периода. В расчетах принят расход подаваемого и удаляемого воздуха $L = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}$, эффективность теплоутилизатора $E = 0,8$, повышение аэродинамического сопротивления каналов $\Delta P = 200 \text{ Па}$,

среднее значение КПД вентиляторов - 0,65, температура внутреннего воздуха $t_B = 18^\circ\text{C}$, среднее значение влагосодержания воздуха в помещении за период теплоутилизации $d_B = 0,0025 \text{ кг/кг}$, граничная температура периода теплоутилизации $t_{GP} = 14^\circ\text{C}$, время начала работы - 8 часов, число рабочих дней в неделю - 5, стоимость тепловой энергии - $c_T = 0,35 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч}$, стоимость электроэнергии - $c_E = 1,7 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч}$, срок эксплуатации СУТ УВ - 20 лет, норма дисконта $r = 0,1$.

Выполненные расчеты показывают, что наиболее существенно экономия тепловой энергии и средств зависят от климатических данных (характеризующихся t_{CP} и ΔZ_{OT}), продолжительности рабочего времени (характеризующихся X_1 , X_2 и n) и эффективности теплоутилизатора E .

Дополнительные затраты средств на электроэнергию заметны – они составляют 10÷20 % от годовой экономии средств. Учет продолжительности периода теплоутилизации, выходящего за рамки отопительного периода, приводит к повышению расчетной экономии тепловой энергии и средств приблизительно на 8÷10 %. Учет суточных колебаний температуры при некруглосуточной работе СУТ УВ приводит к коррекции результата на 5÷7 % в сторону уменьшения экономии тепловой энергии и средств. При круглосуточной работе СУТ УВ этот фактор не оказывает влияния на результаты расчета. Затраты тепловой энергии на размораживание наледи составляют 0÷4 % утилизируемой теплоты, в зависимости от суровости климата и эффективности теплоутилизатора.

В последней графе таблицы представлены величины выгодных и допустимых инвестиций в СУТ УВ, соответствующие указанным выше условиям.

Приведенные расчеты позволяют проанализировать влияние названных выше факторов на эффективность утилизации теплоты и выполнять энергетическую и экономическую оценку перспективности использования того или иного варианта СУТ УВ.

Литература

1. Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В. Оценка экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия. // Ж. АВОК, 2005, №7. – С. 10-16.
2. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2003. – 70 с.