

Технико-экономическая оптимизация температурной эффективности теплоутилизаторов с промежуточным теплоносителем

К.т.н., доцент О.Д. Самарин*,

ГОУ Московский государственный строительный университет

Ключевые слова: технико-экономическая оптимизация; совокупные дисконтированные затраты; срок окупаемости; теплоутилизатор; температурная эффективность.

Как известно, основная идея технико-экономической оптимизации какого-либо инженерного решения и, в частности, энергосберегающих мероприятий при использовании метода совокупных дисконтированных затрат (СДЗ) [1] заключается в нахождении значения некоторого параметра, характеризующего степень реализации данного мероприятия, при котором величина СДЗ принимает минимальное значение для заданного расчетного срока T .

В качестве параметра может быть, например, сопротивление теплопередаче ограждения, диаметр трубопровода или воздуховода, скорость теплоносителя, габариты вентиляционной установки, температурная эффективность теплоутилизатора и т.д. Оптимизация возможна, если при одном и том же изменении параметра капитальные затраты K увеличиваются, а эксплуатационные \mathcal{E} – уменьшаются или наоборот, т.е. меняются в разных направлениях. Например, при повышении теплозащиты ограждающих конструкций, с одной стороны, снижаются расходы \mathcal{E} на тепловую энергию за счет уменьшения трансмиссионных теплопотерь, а с другой – возрастают затраты K на теплоизоляционный материал. Аналогично при уменьшении диаметров трубопроводов или воздуховодов сокращается их стоимость K из-за уменьшения массы металла, но увеличиваются затраты на электроэнергию \mathcal{E} для привода насосов или вентиляторов вследствие возрастания потерь давления при движении теплоносителя. Таким образом, технико-экономическая оптимизация представляет собой обобщение примеров, когда сравниваются только два варианта, для которых выполняется соотношение $K_1 > K_2$, но $\mathcal{E}_1 < \mathcal{E}_2$, потому что теперь речь идет о бесконечном множестве непрерывно переходящих друг в друга сочетаний параметров, среди которых и нужно выбрать наилучший в смысле минимальной величины СДЗ.

Рассмотрим задачу по определению экономически оптимального коэффициента температурной эффективности $k_{эф}$ аппаратов утилизации теплоты с промежуточным теплоносителем в системах механической вентиляции и кондиционирования воздуха (В и КВ). По определению [2] $k_{эф} = \frac{t_{2x} - t_{1x}}{t_{1z} - t_{1x}}$, где t_{1r} и t_{1x} – температуры соответственно вытяжного и приточного воздуха на входе в утилизатор, t_{2x} – температура притока на выходе из аппарата.

Естественно считать, что дополнительные капитальные затраты на теплоутилизационное оборудование $K_{ту}$ будут связаны с величиной поверхности теплообмена теплоизвлекающей и теплоотдающей секций F , m^2 , т.е. в конечном счете с числом единиц переноса теплоты $NTU = \frac{3.6 \cdot KF}{Gc_g}$, где G – массовые расходы потоков приточного и вытяжного воздуха, кг/ч, $c_g = 1.005$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость воздуха, K – коэффициент теплопередачи теплообменника, Вт/($m^2 \cdot K$). Данные по стоимости теплоутилизаторов обычно относятся к максимально возможной температурной эффективности в данной схеме $k_{эф}^{max}$, которую можно принять равной около 0.5 [3], поэтому для промежуточных значений используем пересчет пропорционально величине F , а значит, NTU .

Тогда для величины $K_{ту}$ с учетом того обстоятельства, что при $k_{эф} = k_{эф}^{max}$ затраты на теплоутилизацию с промежуточным теплоносителем $K_{ту}^{max}$ составляют около $\frac{1}{3}$ от расходов на приточную установку в базовом исполнении (приемная секция, фильтр, калорифер и вентилятор), находим:

$$K_{ту} = K_{ту}^{max} \frac{NTU}{NTU_{max}} = \frac{1}{3} \cdot C_{ту} L \frac{NTU}{NTU_{max}},$$

где $NTU_{max} = 2$ для $k_{эф}^{max} = 0.5$ [1], откуда

Самарин О.Д. Технико-экономическая оптимизация температурной эффективности теплоутилизаторов с промежуточным теплоносителем

$$K_{my} = \frac{1}{6} \cdot C_{ny} \cdot L \cdot NTU, \text{ руб.} \quad (1)$$

Здесь величина C_{ny} – удельная стоимость приточной установки в тыс. руб. на 1 тыс м³/ч воздухопроизводительности L с учетом повышающих коэффициентов 1.3 и 1.6 на автоматизацию, монтаж и наладку.

С другой стороны, эксплуатационные затраты на тепловую энергию с учетом рекомендаций [1] и выражения для коэффициента температурной эффективности теплоутилизатора $k_{эф} = \frac{NTU}{NTU + 2}$, полученного в [4] для рассматриваемого здесь случая равенства расходов притока и вытяжки, могут быть вычислены следующим образом:

$$\mathcal{E}_{т.вент} = Z_p \cdot G \cdot c_v \cdot D_d \cdot \frac{2}{2 + NTU} \cdot C_m \cdot 10^{-6} / 4.19, \text{ руб/год.} \quad (2)$$

Здесь z_p – время работы установок В и КВ, часов в сутки; D_d – градусо-сутки отопительного периода в районе строительства, принимаемые по данным [5]; C_t – тариф на тепловую энергию, руб/Гкал; 4.19 – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К).

В работе [6] предлагается следующая формула для СДЗ:

$$СДЗ = K \cdot (1 + p / 100)^T + \mathcal{E} \cdot [(1 + p / 100)^T - 1] \cdot (100 / p), \quad (3)$$

где p – норма дисконта, %.

Она учитывает упущенную выгоду от того, что средства в размере K вложены в энергосбережение вместо размещения под проценты в банке. В расчетах ее можно принимать на уровне не ниже ставки рефинансирования Центрального Банка России. По состоянию на конец 2010 года она равна 7.75% годовых. Величина p связана с текущей величиной этой ставки, а также с коммерческими рисками капиталовложений. В [1], [7] предлагается использовать на ближайшую перспективу значение $p=10\%$. Фактически такой же подход, хотя и с неявным учетом дисконтирования, используется для технико-экономической оптимизации и в пособии [8]. За рубежом аналогичная методика, но в еще более развернутом виде, содержится в документе [9].

Подставляем соотношения для $K_{ты}$ и $\mathcal{E}_{т.вент}$ вместо K и \mathcal{E} в (3), вычисляем производную $d(СДЗ)/d(NTU)$ и приравниваем ее к нулю, откуда после некоторых преобразований для оптимального значения NTU находим:

$$NTU_{opt} = \sqrt{\frac{12 \cdot Z_p \cdot \rho_v \cdot c_v \cdot D_d \cdot C_m \cdot 10^{-6} [(1 + p / 100)^T - 1] \cdot (100 / p)}{4.19 \cdot C_{ny} (1 + p / 100)^T}} - 2. \quad (4)$$

Здесь ρ_v – плотность воздуха, равная около 1.2 кг/м³, а коэффициент 12 в числителе представляет собой 24/2, где 24 – число часов в сутках. Заметим, что в формулу (4) не входит величина воздухопроизводительности системы L , так как она присутствует в выражениях и для $K_{ты}$, и для $\mathcal{E}_{т.вент}$, и при преобразованиях сокращается. Следовательно, оптимальное значение NTU и соответствующий ему $K_{эф}$ могут зависеть от L только в той мере, в какой L влияет на удельную стоимость вентиляционного оборудования C_{ny} .

Анализ соотношения (4) показывает, что при прочих равных условиях оптимальная температурная эффективность теплоутилизаторов повышается с увеличением тарифа на тепловую энергию и в районах с более суровым климатом, и уменьшается с ростом удельной стоимости приточных установок. Объяснить это можно таким же образом, как и в случае с теплозащитой несветопрозрачных ограждений, исходя из того, на какую составляющую СДЗ – K или \mathcal{E} – влияет рассматриваемый фактор. Аналогичный характер зависимости $K_{эф}$ от данных параметров, но без учета дисконтирования, получен ранее в работе [10].

Если принять для примера $D_d=4515$ К·сут по сведениям [5] для Москвы, $z_p=12$ час/сут, $C_t=1290.81$ руб/Гкал (ОАО «МОЭК» для нежилых потребителей в ценах 2010 года), $C_{ny}=27 \cdot 1.3 \cdot 1.6=56.2$ тыс. руб на 1 тыс м³/ч по среднерыночным ценам 2010 года, при $T=5$ лет (максимальный срок для малозатратных мероприятий) получаем:

$$NTU_{opt} = \sqrt{\frac{12 \cdot 12 \cdot 1.2 \cdot 1.005 \cdot 4515 \cdot 1290.81 \cdot 10^{-6} [(1 + 10/100)^5 - 1] \cdot (100/10)}{4.19 \cdot 56.2 \cdot (1 + 10/100)^5}} - 2 = 2.63,$$

откуда $k_{эф.опт} = 2.63/(2 + 2.63) = 0.57$, что даже несколько больше максимально возможного значения, что согласуется и с зарубежными источниками, в частности, [11]. При уменьшении расчетной величины T значение $k_{эф.опт}$ также будет снижаться и достигнет нуля при T порядка одного года (рис. 1). Физически это означает, что любые, даже самые незначительные капиталовложения в теплоутилизацию окупаются не мгновенно, а только спустя некоторое время, которое, как правило, не бывает меньше одного отопительного сезона.

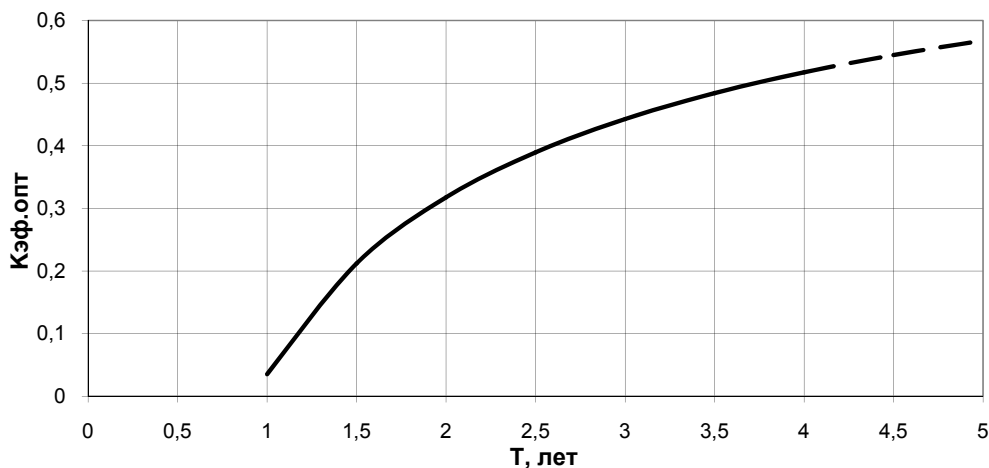


Рисунок 1. Зависимость оптимального коэффициента температурной эффективности теплоутилизатора $k_{эф.опт}$ от расчетного срока окупаемости T

В целом, при проектном сроке окупаемости от 3 лет и более следует принимать $k_{эф}$ на максимально возможном уровне для рассматриваемого способа теплоутилизации, т.е. порядка 0.5. В то же время назначать T на уровне больше, чем 4–5 лет, действительно нецелесообразно. Это подтверждается и зарубежными данными, например, [12].

Таким образом, полученный результат достаточно хорошо подтверждает данные, приведенные автором в работе [4] на основе использования ценовых характеристик оборудования, выпускаемого конкретным производителем, в зависимости от числа рядов трубок и шага пластин теплообменников, соответствующих каждому значению $k_{эф}$. Следовательно, рассмотренная достаточно упрощенная модель, основанная на непрерывной зависимости капитальных затрат от $k_{эф}$, дает весьма достоверные результаты и может быть использована при инженерных расчетах.

Литература:

1. Дмитриев А. Н., Табунщиков Ю. А., Ковалев И. Н., Шилкин Н. В. Руководство по оценке экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия. М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. 120 с.
2. Белова Е. М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях. М.: Евроклимат, 2006. 640 с.
3. Кокорин О. Я. Современные системы кондиционирования воздуха. М.: Физматлит, 2003. 272 с.
4. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. М.: Изд-во АСВ, 2009. 296 с.
5. СНиП 23-01-99* «Строительная климатология». М.: ГУП ЦПП, 2004.
6. Гагарин В. Г. Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий. Часть 1 // АВОК. 2009. № 1. С. 10–16.
7. Р НП «АВОК» 5-2006. Рекомендации по оценке экономической эффективности инвестиционного проекта теплоснабжения. Общие положения. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 24 с.
8. Дмитриев А.Н. Управление энергосберегающими инновациями. М.: Изд-во АСВ, 2001. 314 с.
9. EN 15459:2007. Energy performance of buildings – Economic evaluation procedure for energy systems in buildings.
10. Богуславский Л. Д., Симонова А. А., Митин М.Ф. Экономика теплогазоснабжения и вентиляции. М.: Стройиздат, 1988. 351 с.
11. Ramanauskas R. Efficient use of rotary heat exchangers // Pap. of REHVA'S General Assembly. 2004. P. 360–366.
12. Uzsilaityte L., Martinaitis V. Impact of the implementation of energy saving measures on the life cycle energy consumption of the building // Pap. of conf. of VGTU. 2008. Vol.II, P. 875–881.

*Олег Дмитриевич Самарин, Москва, Россия
Тел. раб.: +7(499)188-36-07; эл. почта: samarin1@mtu-net.ru

Самарин О.Д. Техничко-экономическая оптимизация температурной эффективности теплоутилизаторов с промежуточным теплоносителем