

Утилизация теплоты: годовые режимы

В журнальных статьях и рекламных листках информация о теплоутилизаторе нарастает с приближением холодного периода. Однако, практически все статьи рекламируют то или иное оборудование, либо отдельно взятый процесс, «выхваченный» из системы вентиляции и условий ее работы.

Такой бессистемный подход не выдерживает никакой критики, а результаты оценки эффективности утилизации отличаются от фактических. Это объясняется многообразием типов утилизаторов, сложностью протекающих процессов, зависящих от многих факторов, прежде всего расходов сред и их параметров. Автор поставил перед собой задачу по возможности подробнее и точнее описать эти сложные режимы и их границы, как через параметры, так и через нагрузки объекта, обеспечив тем самым одинаковое понимание и исключив ошибки.

Годовые режимы в проблеме утилизации теплоты являются центральным вопросом, они связывают подсистему утилизации теплоты и холода со всей системой (СКВ, СВ) в целом, ее работой и потребностью их получения, источниками, их мощностью, параметрами и тарифами на энергоносители, одновременной платой за подключение к теплосети и другими обстоятельствами.

Режимам работы до последнего времени уделялось мало внимания: упоминания о них даже на качественном уровне в литературе встречались лишь эпизодически. Как положительный пример укажем, что, например, в справочнике [5, с. 279–280] приводится полное описание разных режимов на основе данных РПИ (А.Я. Креслинь и др.). Подробно они описаны в книге автора этой статьи [4, т. II, ч. 1]. Между тем, без такого представления о режимах нельзя объективно оценить требования к конкретному теплоутилизатору в конкретной системе, правильно определить годовой расход утилизируемой теплоты и холода в данной системе. Теплоутилизатор любого типа, установленный в системе, в течение года может работать в разных режимах.

Общее представление о всех возможных режимах работы этой подсистемы в диапазоне изменения наружных температур от самых низких до самых высоких, получаемых в утилизаторе теплоте и холоде и соответствующей потребности в них, годовых расходах можно получить из сводного графика (рис. 1).

Выполненные построения относятся к случаю (схеме) обработки воздуха, когда после его нагревания не используют последующее изотермическое увлажнение. Этот процесс меняет границу нагревания наружного воздуха с изотермы на изоэнтальпию, требует соответствующих специальных построений границ режимов работы такого утилизатора в двумерном поле $t_n - i_n$ (рис. 26), не описанных в литературе при полном

отрыве отдельных построений от годовых режимов и их анализа.

Для этого случая — т.е. нагрев до $i_k = \text{const}$ — граница двух режимов в общем случае представляет собой кривую, которая при определенных допущениях строится по точкам (H_1, H_2, H_3, \dots), как это показано на рис. 26. Условие равенства потребления и выработки теплоты в теплоутилизаторе выражают точки пересечения семейства параллельных линий потребности в теплоте (параллельные линии 1, $Q_{t, \text{треб}}$) с пересекающей их линией выработки теплоты в теплоутилизаторе (линия 2, $Q_{t, \text{ту}}$).

Режимам работы до последнего времени уделялось мало внимания: упоминалось о них даже на качественном уровне в литературе встречались лишь эпизодически

В результате прямая или кривая H_1, H_2, H_3, \dots разделяет всю область использования нагревания наружного воздуха на два режима: **неуправляемый** (сектор 4) и **управляемый** (сектор 3). Для определения продолжительности более короткого управляемого режима (сектор 3), когда $Q_{t, \text{ту}} > Q_{t, \text{треб}}$, нужно использовать данные о повторяемости в интервалах $t_n \dots i_n, i_n \dots d_n$ или других.

В общем случае утилизатор теплоты и холода может работать в таких режимах (рис. 1а):

- **утилизации теплоты** при $t_n < t_{\text{пр}}$;
- **утилизации холода** при $t_n > t_{\text{пр}}$ (в силу малой разности $t_n - t_v$ летом эта величина может быть незначительна, а режим утилизации коротким);
- **без утилизации теплоты и холода** при $t_n = t_{\text{пр}} \dots t_v$;
- **в неуправляемом режиме**, когда имеет место $Q_{t, \text{ту}} < Q_{t, \text{треб}}$;
- **в управляемом режиме**, когда $Q_{t, \text{ту}} > Q_{t, \text{треб}}$ (граница этих режимов соответствует $t_{n, \text{гран}}$ в точке 1 на пересечении линий $Q_{t, \text{ту}}$ и $Q_{t, \text{треб}}$ (рис. 1а), а чем больше эффективность $Q_{t, \text{ту}}$ (а, как следует из дальнейшего, она переменна), тем ниже $t_{n, \text{гран}}$ длиннее управляемый режим и короче неуправляемый, и вряд ли эти особенности учитывают производители оборудования, обосновывающие его эффективность вообще, а не для конкретных, хотя и типичных условий объекта;
- в зависимости от протекающих на теплой стороне аппарата процессов теплообмена или тепломассообмена **режим работы на его поверхности может быть**

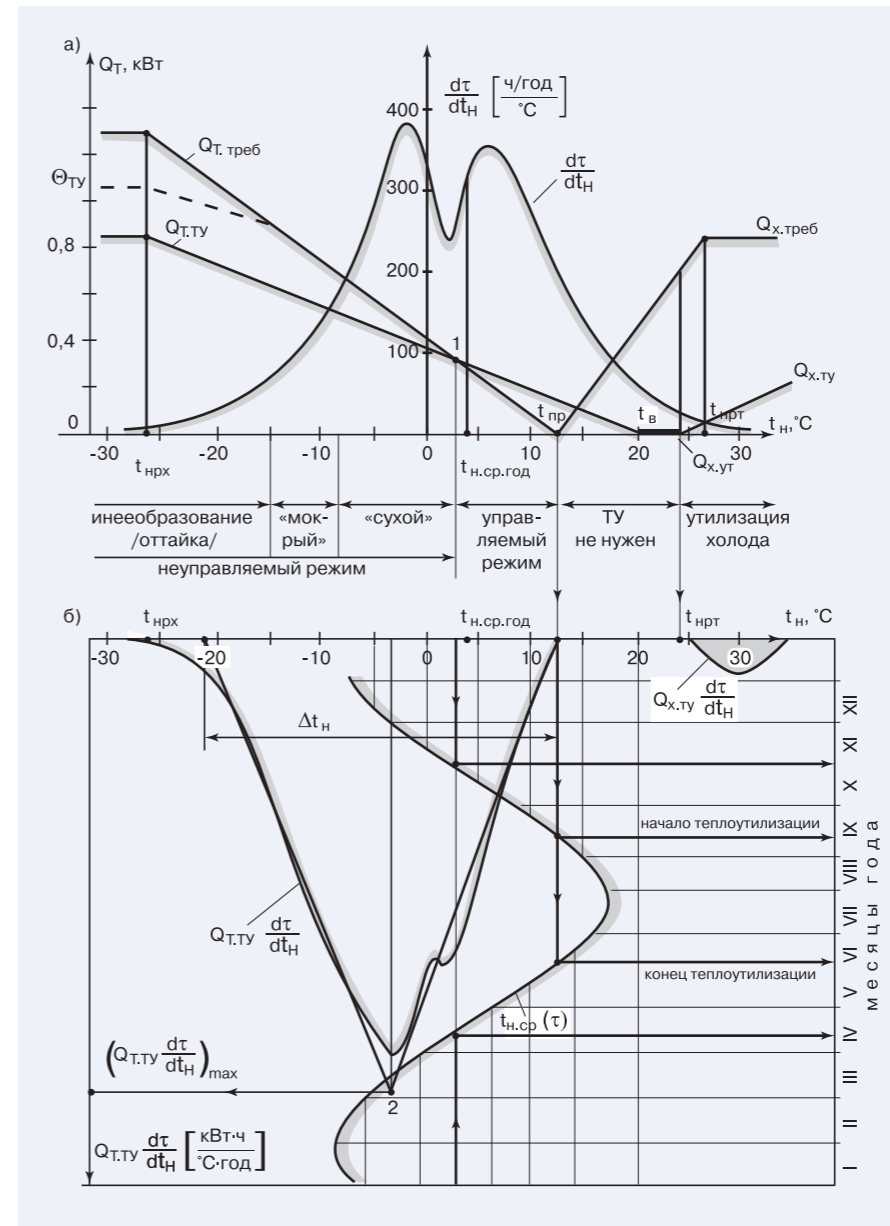


Рис. 1. Сводный график, поясняющий мгновенные расходы и годовые режимы выработки ($Q_{t, \text{ту}}$) утилизатором и потребления теплоты ($Q_{t, \text{треб}}$) и холода ($Q_{x, \text{треб}}$) системой (СКВ, СВ) без изотермического увлажнения [а — режимы работы утилизатора: неуправляемый, управляемый, сухой, мокрый, инееобразование, без утилизации, с утилизацией холода; точка 1 соответствует равенству теплоты, требующейся системе, и утилизируемой; $d\tau/dt_n$, ч/(год·°C) — плотность повторяемости температур при разных температурах наружного воздуха в Санкт-Петербурге; б — графоаналитическое определение годовых расходов утилизируемой теплоты и холода на основе линий произведений $Q_{t, \text{ту}}(d\tau/dt_n)$ при замене площади фигуры равновеликим треугольником с основанием $\Delta t_n = 13 - (-21) = 34$ °C и высотой $(Q_{t, \text{ту}} d\tau/dt_n)_{\text{max}}$ в вершине 2; $t_{n, \text{cp}}(\tau)$ — ход изменения нормы, т.е. средних многолетних температур наружного воздуха на каждое число каждого месяца в Санкт-Петербурге по данным [2]; на этой кривой отмечены средние даты начала и конца использования теплоты утилизатором с середины сентября до начала июня]

сухим, частично мокрым или полностью мокрым, в т.ч. с выпадением влаги и образованием инея (льда) — последнему факту, влияющему на работу аппарата, вентиляционного агрегата и аварийные ситуации, должно уделяться наибольшее внимание;

□ **режим обработки наружного воздуха в теплоутилизаторе** может быть либо его нагреванием, либо нагреванием-увлажнением, что зависит от типа насадки пластинчатого теплоутилизатора: несорбирующей влагу уходящего воздуха, односторонне сорбирующей и сорбирующей

влагу через насадку, перемещающуюся из потока уходящего воздуха в наружный, причем такое увлажнение воздуха считается положительным качеством теплоутилизатора и в определенном смысле заменять увлажнитель, однако, следует заметить, что эта влага — далеко не вода питьевого качества, используемая в увлажнителях (п. 14.1, 14.2 СНиП 41-01-2003), а продукт жизнедеятельности людей, содержит микрофлору, обсемененность, химические вещества и к полезным субстанциям не относится;

□ **режим оттайки** — периодическое отключение аппарата, режим его прогрева, частичное или полное прекращение подачи наружного воздуха с целью ликвидации льда и шубы на теплой стороне аппарата, в т.н. «холодном углу» пластинчатого утилизатора.

Под **неуправляемым режимом работы ТУ** будем понимать такое сочетание исходных данных (температур t_n, t_v , энтальпии i_n , расходов воздуха G_n, G_v , коэффициента эффективности $\theta_{\text{ту}}$, тепловлажностной нагрузки объекта $Q_{\text{изб}}$, $G_{\text{вл}}$ и др.), при котором для нагревания требуется больше теплоты, чем получено в теплоутилизаторе. В этом режиме $\theta_{\text{ту}} = \text{const}$, хотя в общем случае эта величина переменна (рис. 3). В **управляемом режиме**, наоборот, получаемая в утилизаторе теплота избыточна (столько не требуется), и поэтому коэффициент эффективности $\theta_{\text{ту}}$ уменьшают, перепуская воду или наружный воздух по перемычке в обвод аппарата, уменьшая обороты ВРТ. Так же поступают при низких наружных температурах, иногда нагревая утилизатор, чтобы избежать возможного инееобразования на поверхности со стороны уходящего воздуха.

Для оценки продолжительности каждого из режимов на график (рис. 1а) нанесена линия плотности повторяемости температур в данном пункте. Из графика следует, что основное время работы теплоутилизатора может приходиться на неуправляемый режим. Что касается годового расхода утилизируемой теплоты, то, пренебрегая режимами оттайки (удаления инея на теплой стороне аппарата) и считая эффективность аппарата приближенно постоянной, искомым расход может быть наглядно определен графоаналитически как площадь между линией произведения $Q_{t, \text{ту}}(d\tau/dt_n)$ и осью температур t_n с учетом соответствующих масштабов по осям (рис. 1б). Для конкретных кривых искомую площадь определяют, заменяя ее в зависимости от очертания равновеликим треугольником, трапецией или другой канонической фигурой.

Пример 1

Определить годовое количество теплоты, утилизируемой в СВ без увлажнения воздуха или при паровом увлажнении при расчетной условно-постоянной эффективности $\theta_{\text{ту}} = 0,5$, $t_v = 20$ °C, $t_k = t_{\text{пр}} = 10$ °C, $G_n = 1$ кг/с в климатических условиях Санкт-Петербурга при односторонней работе и пятидневной рабочей неделе ($\psi_{\text{см}} = 0,25$). Продолжительность периода при $t_n \leq 10$ °C составляет

$\tau_{cp} = 240$ сут/год (СНиП 23-01-99); средняя температура наружного воздуха за этот период $t_{н,ср} = -0,9^\circ\text{C}$. Граница режима нагревания воздуха в СВ — изотерма ($t_k = 10^\circ\text{C}$).

Определим границу управляемого и неуправляемого режимов работы теплоутилизатора:

$$t_{н,гран} = \frac{t_k - \theta_{ту} t_y}{1 - \theta_{ту}} = \frac{10 - 0,5 \times 20}{1 - 0,5} = 0^\circ\text{C}.$$

На основе климатологических данных определяем продолжительность и среднюю температуру управляемого режима работы ТУ при $t_n = 0 - 10^\circ\text{C}$: $t_{н,ср} = 5^\circ\text{C}$; $\tau_{упр} = 97$ сут/год.

Средняя эффективность управляемого ТУ в этом режиме:

$$\theta_{ту,ср} = \frac{t_k - t_{н,ср}}{t_y - t_{н,ср}} = \frac{10 - 5}{20 - 5} = 0,33.$$

Среднее количество (т.е. год на год не приходится) утилизируемой в управляемом режиме работы ТУ теплоты:

$$Q_{ту,упр,год} = \theta_{ту,ср} G_{всв} (t_y - t_{н,ср}) \times \psi_{см} \tau_{упр} \times 24 \times 10^{-3} = 0,33 \times 1 \times 1 \times [20 - (-5)] \times 0,25 \times 97 \times 24 \times 10^{-3} = 2,9 \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч}/(\text{год}\cdot\text{кг}/\text{с}).$$

Определим продолжительность неуправляемого периода при $t_n < 0^\circ\text{C}$ как разность общей продолжительности при $t_n < 10^\circ\text{C}$ ($\tau_{ту} = 240$ сут/год) и продолжительности управляемого режима при $t_n = 0 - 10^\circ\text{C}$ ($\tau_{упр} = 97$ сут/год).

В результате:

$$t_{неупр} = 240 - 97 = 143 \text{ сут/год}.$$

Определим среднюю температуру наружного воздуха за неуправляемый режим при $t_n < 0^\circ\text{C}$, используя правило смеси:

$$t_{н,ср} = \frac{\tau_{ту} t_{н,ср1} - \tau_{упр} t_{н,ср2}}{\tau_{ту} - \tau_{упр}} = \frac{240(-0,9) - 97 \times 5}{240 - 97} = -4,9^\circ\text{C}.$$

Определим годовой расход утилизируемой теплоты в течение неуправляемого режима работы теплоутилизатора:

$$Q_{ту,неупр,год} = \theta_{ту} G_{всв} (t_y - t_{н,ср}) \times \psi_{см} \tau_{неупр} \times 24 \times 10^{-3} = 0,5 \times 1 \times 1 \times [20 - (-4,9)] \times 0,25 \times 143 \times 24 \times 10^{-3} = 10,7 \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч}/(\text{год}\cdot\text{кг}/\text{с}).$$

В итоге, из общего расхода утилизируемой в СВ теплоты (13,6 тыс. кВт·ч/(год·кг/с)) около 80% приходится на неуправляемый режим работы утилизатора. При изменении условий расчета, особенно эффективности ТУ, это соотношение изменится.

Граница неуправляемого и управляемого режимов работы теплоутилизатора при известных $t_y = 20^\circ\text{C}$, $t_k = t_{пр} = 10^\circ\text{C}$ зависит от его расчетной эффективно-

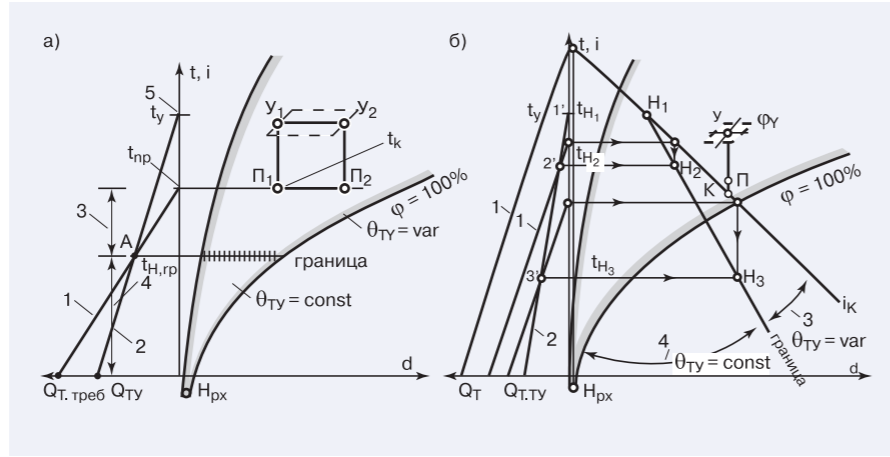


Рис. 2. Методика построения границы управляемого и неуправляемого режимов работы теплоутилизатора при использовании в СКВ и СВ в поле $i-d$ -диаграммы [а — без изотермического (адиабатического) увлажнения; б — с последующим изотермическим увлажнением воздуха; на обоих графиках дополнительно введенная левая полуплоскость используется для построения линий выработки теплоты утилизатором $Q_{т,тр.об}$ и потребления теплоты $Q_{л,тр.об}$ системой: 1 — линия потребности в теплоте, 2 — линия выработки теплоты в теплоутилизаторе, 3 — управляемый режим работы теплоутилизатора $Q_{ту} > Q_{л,тр.об}$, 4 — неуправляемый режим работы теплоутилизатора $Q_{ту} < Q_{л,тр.об}$, линии 1', 2', 3' и соответствующие точки H_1, H_2, H_3 являются точками пересечения мгновенных значений потребности в теплоте и линейной в зависимости от температуры t_n выработки теплоты в теплоутилизаторе]

сти $\theta_{ту}$. Используя данные о плотности повторяемости наружных температур $\Delta t / \Delta t_n$, для любого города можно оценить не только повторяемость, но и среднюю температуру $t_{н,ср}$ в каждом из режимов работы ТУ. При других t_y и t_k построения выполняют аналогично, и граничная температура:

$$t_{н,гран} = \frac{t_k - \theta_{ту} t_y}{1 - \theta_{ту}} = f(\theta_{ту}).$$

Границу режима нагревания воздуха в СКВ и СВ, как и границу неуправляемого и управляемого режимов $t_{н,гран}$, можно в общем случае вычислить строго аналитически. Для этого приравняют мгновенные значения требуемого системой расхода теплоты с учетом возможных теплотерь в режиме воздушного отопления с удельной величиной $q_0 = \sum k_n F_n$ [кВт/°C] и вводимого в систему наружного воздуха с общей теплоемкостью $q_v = G_{нсв}$ [кВт/°C] в записи через исходные данные объекта по А.А. Рымкевичу [3]:

$$Q_{т,тр.об} = (G_{нсв} + \sum k_n F_n)(t_y - t_n) - \sum Q_{изб} - \Delta Q_{пр} \quad (1)$$

и мгновенного расхода теплоты, получаемой в теплоутилизаторе того или иного типа при его температурной эффективности $\theta_{ту}$:

$$Q_{ту} = G_{нсв} \theta_{ту} (t_y - t_n). \quad (2)$$

Границу управляемого и неуправляемого режимов определяют после несложных преобразований из выражения:

$$t_{н,гран} = t_y - \frac{\sum Q_{изб} + \Delta Q_{пр}}{G_{нсв}(1 - \theta_{ту}) + \sum k_n F_n}, \quad (3)$$

где $\sum Q_{изб}$ — текущие избытки явной теплоты в помещении или их группе,

обслуживаемой данной системой, кВт; $\Delta Q_{пр}$ — теплота при нагреве наружного (приточного) воздуха в вентиляторе, двигателе и воздуховодах: $\Delta Q_{пр} = G_{нсв} \Delta t_{пр}$ [кВт], где $\Delta t_{пр} = 1 - 2^\circ\text{C}$. Как следует из выражения (3), граница управляемого и неуправляемого режимов не постоянна, а зависит от многих переменных, прежде всего теплоизбытков. При их отсутствии в помещении $t_{н,гран} = t_y$, и режим работы теплоутилизатора один — неуправляемый; при наличии теплотерь и воздушном отоплении $t_{н,гран} > t_y$.

Поясним примером методику определения границы неуправляемого и управляемого режимов работы теплоутилизатора через известные нагрузки.

Пример 2

В помещении, обслуживаемом прямой приточно-вытяжной системой теплоизбытки: $\sum Q_{изб} = 10$ кВт; удельные теплотери, учитываемые при воздушном отоплении: $q_0 = \sum k_n F_n = 0,2$ кВт/°C; расход наружного (приточного) воздуха: $G_n = 1,5$ кг/с; нагрев его за счет потерь энергии в вентиляторе, двигателе и воздуховодах:

$$\Delta t_{пр} = 0,8 \frac{P_v}{\eta_v \eta_{дв} \eta_{пер}} = 1,5^\circ\text{C},$$

где P_v — полное давление вентилятора, кПа; $\theta_{ту} = 0,70$ — эффективность данного теплоутилизатора.

Требуется определить мгновенное значение границы неуправляемого и управляемого режимов работы теплоутилизатора при этих исходных данных и температуре $t_y = t_n = 20^\circ\text{C}$.

По формуле (3) граница этих режимов, выраженная через нагрузки, равна:

$$t_{н,гран} = 20 - \frac{10 + 1,5 \times 1 \times 1,5}{1,5 \times 1 (1 - 0,7) + 0,2} = 1^\circ\text{C}.$$

Это значит, что при данном сочетании теплоизбытков и теплотерь помещения, расхода наружного воздуха и при известной эффективности теплоутилизатора значительную часть года при $t_n < t_{н,гран} = 1^\circ\text{C}$ теплоутилизатор работает в неуправляемом режиме ($\theta_{ту} = \text{const}$), а другую, тоже весьма продолжительную часть года при $t_n = t_{н,гран} \dots t_{пр} = 1 - 13^\circ\text{C}$ — в управляемом режиме ($\theta_{ту} = \text{var}$). Температура $t_k = t_{пр} = 13^\circ\text{C}$ вычислена по формуле (3) при $\theta_{ту} = 0$.

В технико-экономических расчетах, обосновывающих целесообразность при-

менения теплоутилизатора, границу режимов правильно определять при средних значениях теплоизбытков в рабочее время и отдельно в нерабочее время при подаче наружного воздуха и воздушном отоплении, $\sum Q_{изб} = 0$ и $t_y = t_{в,мин} = 14^\circ\text{C}$ (или другой минимально допустимой). В большинстве, если не во всех публикациях, это обстоятельство никак не учитывают, а теплоутилизатор предполагают используемым по умолчанию только в одном режиме — неуправляемом, когда количество утилизируемой теплоты максимально.

Необходимо также отметить, что коэффициент эффективности теплоутилизатора, рассчитанный для сухого теплообмена, зависит как от температур, так и от влажности потоков воздуха [1]. На рис. 3а представлена зависимость ко-

эффициента эффективности перекрестноточного рекуператора от температуры наружного и влажности удаляемого воздуха. При расчетах неизменными приняты начальная температура удаляемого воздуха $t_{y1} = 22^\circ\text{C}$, а влажность наружного воздуха $\phi_{n1} = 75\%$.

Из рис. 3 видно, что по мере снижения температуры наружного воздуха коэффициент эффективности рекуператора уменьшается (кривая $\phi_y = 0$, удаляемый воздух сухой). Данное явление связано с тем, что величина нагрева наружного воздуха и разница температур потоков на входе в теплообменный пакет возрастают неравномерно. Рост разницы температур потоков на входе $t_{y1} - t_{n1}$ опережает возрастание степени нагрева наружного воздуха $t_{k1} - t_{n1}$. Для обеспечения равной эффективности при больших разностях температуры рекуператор должен иметь более развитую поверхность теплообмена. В том случае, если удаляемый воздух является влажным, охлаждение до температуры ниже точки росы влечет за собой конденсацию водяного пара. Теплота конденсации передается наружному воздуху, повышая температуру последнего на выходе из пакета.

Анализируя характер поведения кривых $\theta_{ту} = f(t_n)$ (рис. 3а), можно отметить, что термическая эффективность рекуператора начинает возрастать с уменьшением критической температуры наружного воздуха, начиная с которой образуется конденсат. Данный факт обычно не находит отражения в руководствах по эксплуатации теплообменных аппаратов. При этом производитель обычно гарантирует работу рекуператора с фиксированной эффективностью во всем диапазоне температур за исключением периода обмерзания. Отмечено (рис. 3б), что чем выше эффективность утилизатора, тем быстрее протекает процесс инееобразования на его пластинах во времени. ●

Продолжение следует.

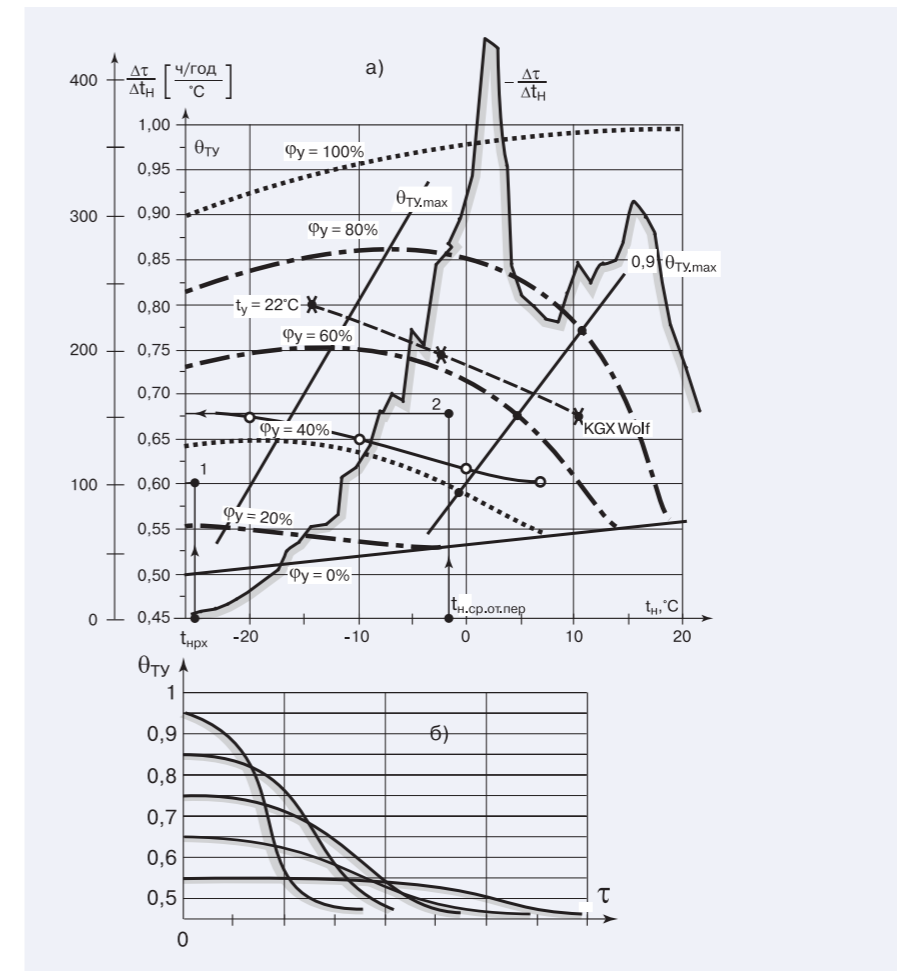


Рис. 3. Различные зависимости [а — зависимость мгновенной эффективности перекрестноточного рекуператора РКПл-160 (производства ООО «БТК-Компоненты») от температуры наружного воздуха и относительной влажности уходящего воздуха: $\phi_{y1} = 0\%, 20\%, 40\%, 60\%, 80\%, 100\%$ и сравнение с опытными данными других производителей (x — данные для утилизатора KGX Wolf при $t_y = 22^\circ\text{C}$, $\phi_y = 72\%$, $G_n/G_y = 1$; o — опытные данные для утилизатора VKMU Fläkt при $t_y = 20^\circ\text{C}$, $\phi_y = 40\%$, $G_n/G_y = 1$. Задача: сравнить температурную эффективность пластинчатого теплоутилизатора в расчетных зимних условиях ($t_{н,р} = -25^\circ\text{C}$, $\phi_y = 30\%$, точка 1) и в средних за отопительный период условиях ($t_{н,ср} = -2^\circ\text{C}$, $\phi_{у,ср} = 50\%$, точка 2). В поле рисунка определяем, что в расчетных условиях $q_{ту} = 0,60$, а в среднем за отопительный период $q_{ту,ср} = 0,68$, поэтому приближенный расчет утилизируемой теплоты в данном случае будет содержать запас; б — примерная зависимость изменения эффективности теплоутилизатора при образовании инея во времени и от расчетной эффективности]