

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРОВ

**А.Г. Цубанов,**

*доцент каф. энергетики БГАТУ, канд. техн. наук, доцент,*

**А.Л. Сняков,**

*профессор каф. технической эксплуатации авиационного оборудования  
Белорусской государственной академии авиации, канд. техн. наук, доцент,*

**И.А. Цубанов,**

*ст. преподаватель каф. энергетики БГАТУ*

*Рассмотрены методы повышения эффективности кожухотрубчатых теплоутилизаторов путем изменения режимных и геометрических параметров.*

*Ключевые слова: эффективность, кожухотрубчатый теплоутилизатор, диаметр, длина труб.*

*The methods of increasing the efficiency of shell and tube exchangers by changing the regime and geometrical parameters are examined.*

*Keywords: efficiency, shell and tube exchangers, diameter, pipe length.*

### Введение

К энергосберегающим мероприятиям в сельскохозяйственных производственных помещениях относится утилизация теплоты удаляемого из помещений воздуха [1-3]. За счет подогрева в теплоутилизаторах (ТУ) приточного воздуха, подаваемого в помещения, обеспечивается снижение потребления тепловой энергии системами отопления и вентиляции на 30-60 %.

ТУ, предназначенные для использования в запыленной и агрессивной воздушной среде сельскохозяйственных производственных помещений, должны быть простыми по конструкции, надежными при эксплуатации, характеризоваться достаточно высокой эффективностью работы и надежным разделением воздушных потоков, иметь свободный доступ к теплообменным поверхностям для их очистки от загрязнений. При этом желательно предусмотреть возможность изготовления теплообменных поверхностей из неметаллических материалов, не подверженных коррозии со стороны агрессивной воздушной среды.

Наибольшее распространение получили пластинчатые теплоутилизаторы (ПТУ), при изготовлении которых обычно используют стальные или алюминиевые пластины малой толщины. Однако они предназначены для помещений с малозапыленной воздушной средой [2, 3]. Для возможности их применения в помещениях с запыленной воздушной средой необходимо устанавливать воздушные фильтры на входе запыленного вытяжного воздуха в ТУ.

Кожухотрубчатые теплоутилизаторы (КТУ) в основном отвечают вышеприведенным требованиям.

Проблема разработки КТУ заключается в обеспечении высокой эффективности их работы при приемлемых габаритах и материалоемкости. КТУ суще-

ственно уступают ПТУ по компактности: их удельная поверхность теплообмена в единице объема не более  $100 \text{ м}^{-1}$ , а в ПТУ – до  $300 \text{ м}^{-1}$ . Однако большая удельная поверхность в ПТУ объясняется малой шириной каналов (щелей) между пластинами. Ширина каналов – 2-4 мм способствует быстрому забиванию каналов пылью и другими отложениями, что и приводит к необходимости установки воздушных фильтров. Это типичный пример, когда недостатки являются продолжением достоинств.

В работах [4-6] приведены расчетные уравнения, характеризующие эффективность теплообменников (в том числе и теплоутилизаторов). Однако не установлена зависимость эффективности от режимных и геометрических параметров, к которым в случае использования КТУ следует отнести скорости воздушных потоков, диаметр и длину труб и др.

Цель работы – выполнить анализ эффективности КТУ и установить влияние геометрических и режимных параметров на эффективность КТУ.

### Основная часть

Эффективность пластинчатых и кожухотрубчатых ТУ характеризуется коэффициентом эффективности. Коэффициент эффективности определяется как доля тепловой мощности (теплопроизводительности) ТУ от максимально возможной тепловой мощности (теплопроизводительности), достигаемой в ТУ с бесконечно большой поверхностью теплообмена при противоточной схеме движения вытяжного и приточного воздуха.

Исходя из конструктивных соображений, наиболее приемлемой в КТУ является конструктивная схема с перекрестным током теплоносителей (в данном

случае вытяжного и приточного воздуха). Представляется целесообразным сопоставить эффективность ТУ при перекрестном токе и при противотоке, при котором достигается наибольшая эффективность.

Для КТУ в условиях перекрестного тока и подачи вытяжного воздуха в трубы воспользуемся зависимостью [4]:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(-\frac{\Gamma W_{\max}}{W_{\min}}\right), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент эффективности;

$\Gamma$  – характерный параметр;

$W_{\max}$  и  $W_{\min}$  – водяной эквивалент, наибольший и наименьший из двух водяных эквивалентов теплоносителей, Вт/К.

Водяные эквиваленты определяются произведениями удельной изобарной теплоемкости на массовый расход.

При этом:

– для вытяжного воздуха как горячего теплоносителя

$$W_{\max} = \xi c_{p1} m_{t1}, \quad (2)$$

где  $\xi$  – коэффициент влаговываждения на поверхности теплообмена при охлаждении удаляемого вытяжного воздуха;

$c_{p1}$  – удельная изобарная теплоемкость вытяжного воздуха, Дж/(кг·К);

$m_{t1}$  – массовый расход вытяжного воздуха, кг/с;

– для приточного воздуха как холодного теплоносителя

$$W_{\min} = c_{p2} m_{t2}, \quad (3)$$

где  $c_{p2}$  – удельная изобарная теплоемкость приточного воздуха, Дж/(кг·К);  $m_{t2}$  – массовый расход приточного воздуха, кг/с.

Характерный параметр

$$\Gamma = 1 - \exp\left(-N W_{\min} / W_{\max}\right), \quad (4)$$

где  $N$  – число единиц переноса (ЧЕП), определяемое как

$$N = \frac{kA}{W_{\min}}, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$A$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

В расчетах пользуются отношением водяных эквивалентов:

$$w = \frac{W_{\min}}{W_{\max}}. \quad (6)$$

Наибольшей эффективностью обладает противоточная схема [5]:

– при  $w \neq 1$

$$\varepsilon_{\Leftrightarrow} = \frac{1 - \exp[-N(1-w)]}{1 - w \exp[-N(1-w)]}, \quad (7)$$

– при  $w = 1$

$$\varepsilon_{1,\Leftrightarrow} = \frac{N}{1+N}. \quad (8)$$

В условиях работы КТУ в отопительно-вентиляционных системах равны массовые расходы и удельные изобарные теплоемкости приточного и вытяжного воздуха. Из уравнений (2) и (3) следует, что отношение водяных эквивалентов обратно пропорционально коэффициенту влаговываждения:

$$w = 1 / \xi.$$

Коэффициент влаговываждения определяет увеличение теплоотдачи в условиях «мокрого» теплообмена при конденсации водяных паров из состава влажного воздуха. В практике инженерных расчетов его принято принимать в пределах от 1 до 2,5. В случае «сухого» теплообмена без выпадения влаги  $\xi = 1$ .

Пользуясь уравнениями (1), (4), (7) и (8), выполним расчет коэффициентов эффективности КТУ (рис. 1).

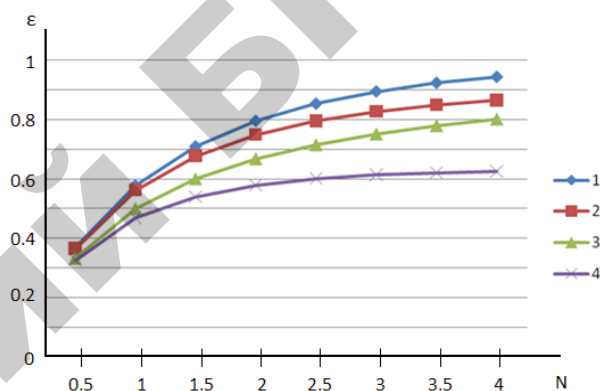


Рисунок 1. Коэффициент эффективности КТУ в зависимости от ЧЕП:

1 – противоток при  $\xi = 2,5$ ; 2 – перекрестный ток при  $\xi = 2,5$ ; 3 – противоток при  $\xi = 1$ ; 4 – перекрестный ток при  $\xi = 1$

Исходя из приведенных на рис. 1 графиков, можно заключить:

– коэффициент эффективности при увеличении ЧЕП от 0,5 до 2 увеличивается в 2-2,7 раза, а при увеличении ЧЕП от 2 до 4 – на 10-30 %;

– коэффициенты эффективности при противотоке больше по сравнению с перекрестным током, это различие увеличивается с ростом ЧЕП и уменьшается при увеличении влаговываждения;

– влияние влаговываждения на коэффициент эффективности проявляется в большей мере при возрастании ЧЕП;

– с уменьшением ЧЕП графики сближаются, и при  $N=0,5$  для рассмотренных условий работы КТУ коэффициент эффективности  $\varepsilon \approx 0,35$ .

Отсюда вытекают два важных вывода:

– в наиболее холодный период, который является расчетным режимом работы КТУ и для которого характерны значительные влаговываждения, значения эффективности КТУ при перекрестном токе и при противотоке достаточно близки друг к другу;

– целесообразно ограничиться увеличением ЧЕП до значений не более 2, т.к. дальнейшее его увеличение не существенно сказывается на эффективности КТУ, но приводит к существенному увеличению площади поверхности теплообмена, материалоемкости и стоимости КТУ.

При разработке КТУ следует использовать конструктивную схему с шахматным трубным пучком, одностороннюю, с перекрестным током и вертикальными трубами. Движение вытяжного воздуха внутри труб в направлении сверху вниз, а приточного – в горизонтальном направлении между трубами [7].

С целью анализа эффективности КТУ необходимо получить зависимость величины ЧЕП от режимных и геометрических параметров.

В формуле (5) используем уравнения для расчета: – коэффициента теплопередачи [7]:

$$k = 2,3 \mu_{cm} \xi^{0,64} w_1^{0,512} w_2^{0,216} d_1^{-0,272}, \quad (9)$$

где  $2,3$  – размерный коэффициент,  $\text{кг}/(\text{К}\cdot\text{м}^{0,456}\cdot\text{с}^{2,272})$ ;

$\mu_{cm}$  – коэффициент загрязнения;

$w_1$  – скорость вытяжного воздуха внутри труб, м/с;

$w_2$  – скорость приточного наружного воздуха в самом узком поперечном сечении пучка, м/с;

$d_1$  – внутренний диаметр труб, м;

– площади поверхности теплообмена труб малой толщины:

$$A = \pi d_1 H n, \quad (10)$$

где  $H$  – рабочая высота (длина) труб, м;

$n$  – число труб;

– меньшего значение водяного эквивалента с учетом равенства массовых расходов приточного и вытяжного воздуха:

$$W_{min} = 0,25 c_{p2} \rho_1 w_1 \pi d_1^2 n, \quad (11)$$

где  $\rho_1$  – плотность вытяжного воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

После подстановки уравнений (9), (10) и (11) в формулу (5) находим:

$$N = 9,2 \frac{\mu_{cm} \xi^{0,64} w_2^{0,216} H}{c_{p2} \rho_1 w_1^{0,488} d_1^{1,272}}. \quad (12)$$

Наибольшее влияние на значение ЧЕП оказывают геометрические параметры – диаметр и высота труб.

От диаметра труб зависят и коэффициент теплопередачи, и число труб, и поверхность теплообмена, и материалоемкость КТУ. Уменьшение диаметра труб в 2 раза при прочих равных условиях (в том числе и при неизменном расходе воздуха) сопровождается увеличением ЧЕП в 2.4 раза, числа труб в 4 раза, поверхности теплообмена в 2 раза и материалоемкости примерно в 2 раза при равной толщине труб в первом и втором случае.

Значение ЧЕП прямо пропорционально высоте труб, которая определяет площадь поверхности теплообмена.

В меньшей степени на ЧЕП влияют режимные параметры – коэффициенты загрязнения и влаговыпадения, скорости воздушных потоков,

Выпадение влаги на внутренней поверхности труб неразрывно связано с условиями работы КТУ (температурным и влажностным режимом, расходами воздуха и тепловой мощностью). Коэффициент влаговыпадения определяется условиями тепло- и массообмена между удаляемым вытяжным воздухом и поверхностью труб.

Скорость приточного воздуха при поперечном обтекании труб не оказывает существенного влияния на ЧЕП, ее увеличение в 2 раза приводит к увеличению ЧЕП на 16 %.

Увеличение скорости воздуха в трубах  $w_1$  сопровождается уменьшением ЧЕП и числа труб, при этом уменьшение числа труб происходит в большей степени по сравнению с уменьшением ЧЕП. Следует отметить, что при принятом расходе воздуха число труб задано диаметром труб и скоростью удаляемого вытяжного воздуха в трубах. Тем самым во многом определены габариты и материалоемкость КТУ.

С целью снижения габаритов КТУ следует стремиться к увеличению скорости воздуха в трубах до максимального значения, определяемого из условия допустимого аэродинамического сопротивления воздушного тракта КТУ.

Выполним расчет по уравнению (12), принимая:  $c_{p2} = 1010 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  при средней температуре приточного воздуха –  $10^\circ\text{C}$ , и  $\rho_1 = 1,25 \text{ кг}/\text{м}^3$  при средней температуре вытяжного воздуха  $10^\circ\text{C}$  [8], а также средние значения  $\mu_{cm} = 0,75$ ;  $\xi = 1,7$ ;  $w_2 = 8 \text{ м}/\text{с}$  и  $w_1 = 10 \text{ м}/\text{с}$ .

Результаты расчета представлены на рис. 2.

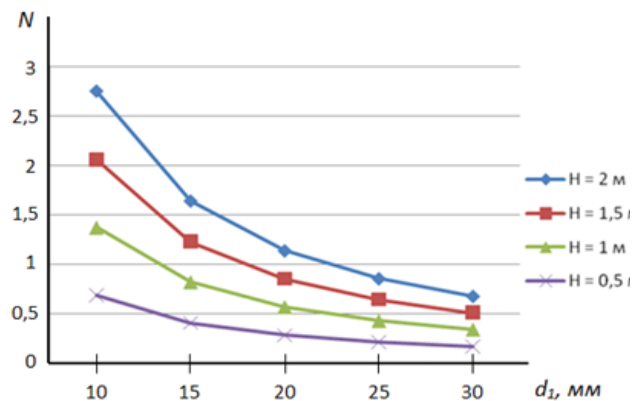


Рисунок 2. Число единиц переноса КТУ в зависимости от диаметра и высоты труб

Значительное увеличение  $N$  происходит при уменьшении диаметра труб и увеличении их высоты.

Для достижения  $N > 1$  необходимо использовать трубы диаметром не менее 20 мм и высотой более 1 м.

Значительное увеличение  $N$  происходит при уменьшении диаметра труб и увеличении их высоты.

Влияние геометрических параметров на коэффициент эффективности КТУ представлено на рис. 3.

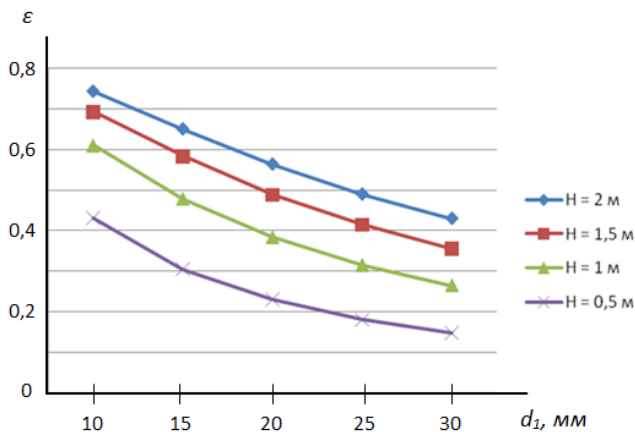


Рисунок 3. Коэффициент эффективности КТУ в зависимости от диаметра и высоты труб

При этом коэффициент эффективности рассчитывается по формуле (1) с учетом расчетов ЧЕП по уравнению (12) при принятых выше параметрах.

Следует отметить, что применение труб малой высоты (0,5 м) не обеспечивает приемлемой эффективности КТУ.

Коэффициент эффективности не менее 0,5 достигается:

- при высоте труб – 1 м и диаметре менее 15 мм;
- при высоте труб – 1,5 м и диаметре не более 20 мм;
- при высоте труб – 2 м и диаметре не более 25 мм.

Сопоставим коэффициенты эффективности ПТУ и КТУ.

Коэффициенты эффективности ПТУ находятся в пределах 0,4-0,6 [2, 3]. Согласно рис. 3, коэффициент эффективности КТУ в ряде случаев больше приведенных значений: при высоте труб в 1,5 м и диаметре в пределах 10-15 мм он равен 0,58-0,7.

Выбор диаметра и высоты труб является технико-экономической задачей: энергосбережение и снижение расходов топлива и энергии достигаются за счет увеличения числа труб, габаритов и материалоемкости КТУ, что приводит к увеличению его стоимостных показателей. Рассматривая энергосбережение при использовании КТУ, следует учесть увеличение потребления электроэнергии приточным и вытяжным вентиляторами при установке теплоутилизатора.

КТУ обладают простой конструкцией, допускают использовать неметаллические (стеклянные, пластмассовые и др.) трубы, производить очистку загрязненных поверхностей труб непосредственно в местах их размещения, что позволяет их эксплуатировать без установки воздушных фильтров. Эти достоинства во многом компенсируют недостаток КТУ, заключающийся в меньшей удельной поверхности теплообмена в единице объема по сравнению с ПТУ.

### Заключение

Научное значение проведенного исследования состоит в обосновании применения в КТУ перекрест-

ного тока теплоносителей и в нахождении расчетного уравнения (12), определяющего влияние режимных и геометрических параметров на ЧЕП и, следовательно, на эффективность КТУ.

Практическое значение заключается в установлении степени влияния режимных и геометрических параметров на эффективность КТУ.

В результате проведенного анализа эффективности КТУ установлено:

- основными управляющими параметрами, определяющими эффективность и тепловую мощность КТУ, являются диаметр и высота труб;
- при уменьшении диаметра труб и увеличении их высоты достигаются значения коэффициента эффективности до 0,7 и более;
- скорости воздушных потоков влияют на ЧЕП и на коэффициент эффективности КТУ в меньшей мере по сравнению с размерами труб.
- по эффективности КТУ не уступают ПТУ.

С учетом полученных результатов представляется целесообразным продолжение работ по разработке КТУ для их использования в отопительно-вентиляционных системах сельскохозяйственных производственных помещений.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баротфи, И. Энергосберегающие технологии и агрегаты на животноводческих фермах / И. Баротфи, П. Рафан. – М.: Агропромиздат, 1988. – 228 с.
2. Марочкин, В.К. Использование вторичных топливно-энергетических ресурсов в сельском хозяйстве / В.К. Марочкин, Н.Д. Байлук, М.Ю. Брилевский. – Мн.: Ураджай, 1989. – 200 с.
3. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: справ. пос. / Л.Д. Богуславский и [др.]; под ред. Л.Д. Богуславского и В.И. Ливчака. – М.: Стройиздат, 1990. – 624 с.
4. Кэйс, В.М. Компактные теплообменники / В.М. Кэйс, А.Л. Лондон. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 160 с.
5. Григорьев, В.А. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справоч. / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 586 с.
6. Промышленные теплообменные процессы и установки / А.М. Бакластов и [др.]; под ред. А.М. Бакластова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.
7. Герасимович, Л.С. К расчету коэффициента теплопередачи кожухотрубчатых теплоутилизаторов в отопительно-вентиляционных системах сельскохозяйственных производственных помещений / Л.С. Герасимович, И.А. Цубанов // Агропанорама, 2014. – №5. – С.32-35.
8. Краснощеков, Е.А. Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 01.09.2015