

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ  
ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фираго, Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
2. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кириякин // Электричество, 1998. – № 4. – С. 38-42.
3. Дементьев, Ю.Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пос./ Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: ТПУ, 2009. – 224 с.
4. Дружинин, А.В. Определение параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя при расчете систем управления частотно-регулируемым электроприводом / А.В. Дружинин,

Е.А. Дружинина, В.Н. Полузадов // Изв. вузов. Горный журнал, 2013. – № 3. – С. 98-105.

5. Гридин, В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным / В.М. Гридин // Электричество, 2012. – № 5. С. 40-44.

6. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учеб. для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

7. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб. для вузов / А.И. Вольдек. – 2-е изд.; перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

8. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 19.08.2016

УДК 536.27

## К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХА НА ВЫХОДЕ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРОВ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ

**А.Г. Цубанов,**

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

**И.А. Цубанов,**

*ст. преподаватель каф. энергетики БГАТУ*

**И.А. Цубанова,**

*ст. преподаватель каф. прикладной информатики БГАТУ*

*В статье предложена методика теплового расчета параметров вытяжного воздуха на выходе из кожухотрубчатого теплоутилизатора в системах вентиляции с учетом влияния влаговываждения на процессы теплообмена.*

*Ключевые слова: кожухотрубчатый теплоутилизатор, вытяжной воздух, влаговываждение, температура и энтальпия.*

*The article proposes a method for calculating the thermal exhaust air parameters at the output from the shell and tube heat exchanger in the ventilation systems, taking into account the impact of moisture fall on heat transfer processes.*

*Keywords: shell and tube heat recovery loop, exhaust air, moisture fall, temperature and enthalpy.*

### Введение

Одной из задач теплового расчета кожухотрубчатых теплоутилизаторов (КТУ) систем вентиляции является расчет параметров вытяжного воздуха на выходе теплоутилизатора. Их нахождение позволяет завершить тепловой расчет КТУ: определить тепловую мощность (теплопроизводительность); конечные параметры приточного воздуха, коэффициент влаговываждения и коэффициент эффективности его работы.

При тепловом расчете КТУ, как рекуперативных теплоутилизаторов (ТУ), используют методику проектного (конструкторского) и поверочного теплового расчета рекуперативных теплообменных аппаратов [1].

При этом в тепловых расчетах все большее распространение находит метод эффективности, основанный на использовании безразмерных характеристик: коэффициента эффективности и числа единиц переноса [1].

Основой теплового расчета ТУ в системах вентиляции и кондиционирования являются уравнения теплопередачи, тепловой эффективности, теплового и материального баланса [2-4].

КТУ могут работать в режиме «сухого» теплообмена при отсутствии конденсации водяных паров из состава вытяжного воздуха и в режиме «мокрого» теплообмена с выпадением конденсата на поверхности трубок со стороны вытяжного воздуха.

Тепловой расчет рекуперативных ТУ в режиме «сухого» теплообмена выполняется по общепринятой методике теплового расчета рекуперативных теплообменников [1] и не вызывает особых затруднений [2, 4].

Однако тепловой расчет в условиях «мокрого» теплообмена существенно усложняется из-за одновременно протекающих в теплоутилизаторе процессов тепло- и массообмена.

Поэтому в разработанных методиках теплового расчета рекуперативных ТУ для нахождения искомым величин используют метод итераций. Так, на выходе ТУ находят температуру вытяжного воздуха [2], или температуру приточного воздуха [4].

Поверхностные воздухоохлаждатели характеризуются аналогичным процессом охлаждения воздуха, сопровождающимся его осушением при выпадении влаги. В их тепловом расчете пользуются аналогичным подходом: при «сухом» теплообмене применяется традиционная методика, а при «мокром» – задаются значением искомой величины или применяют метод итераций [5-9].

В связи с этим необходимо продолжить исследования по методике теплового расчета рекуперативных ТУ в системах вентиляции в условиях охлаждения и осушения вытяжного воздуха с целью избежать применения метода итераций.

Анализ процессов теплообмена в КТУ показал, что наиболее целесообразно, по мнению авторов, найти расчетные зависимости для определения температуры и энтальпии вытяжного воздуха на выходе КТУ.

Цель настоящей работы:

- выполнить анализ влияния параметров теплового режима работы КТУ в системах вентиляции на конечные параметры вытяжного воздуха в условиях влаговываждения;
- предложить зависимости для расчета температуры и энтальпии вытяжного воздуха на выходе из КТУ в условиях влаговываждения.

### Основная часть

Принимаем конструктивную схему КТУ с шахматным трубным пучком, одноходовую, с перекрестным током и вертикальными трубами. Вытяжной воздух движется внутри труб сверху вниз, а приточный – горизонтально по межтрубному пространству [10].

Характеризуя изменение состояния влажного воздуха при его охлаждении и осушении с выпадением влаги, в качестве основной базы принимают правило прямой линии [6, 11]. График процесса в диаграмме влажного воздуха – прямая линия, начальная точка которой определена состоянием вытяжного воздуха на входе в КТУ, а конечная точка является точкой ее пересечения с кривой насыщенного влажного воздуха.

Будем считать, что при работе КТУ в условиях влаговываждения эта конечная точка процесса определяет состояние вытяжного воздуха на выходе из КТУ, которое характеризуется температурой и энтальпией насыщенного влажного воздуха при относительной влажности – 100 %.

Для нахождения уравнения для расчета энтальпии насыщенного вытяжного воздуха на выходе из КТУ в зависимости от температуры, соответствующей условиям его охлаждения, были использованы справочные данные [11].

В основу расчетной зависимости было положено уравнение кубического многочлена:

$$h = a + bt + ct^2 + dt^3, \quad (1)$$

где  $h$  и  $t$  – энтальпия, кДж/кг, и температура, °С насыщенного влажного воздуха;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  – коэффициенты.

Методом итераций были определены коэффициенты:

$$c = 0,021 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C}^2) \text{ и } d = 0,0006 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C}^3).$$

Это позволило перейти к линейной регрессии:

$$H = a + bt, \quad (2)$$

$$\text{где } H = h - ct^2 - dt^3.$$

Линейная регрессия согласно уравнению (2) приведена на рисунке 1.

Очевидно, что расчетные точки располагаются

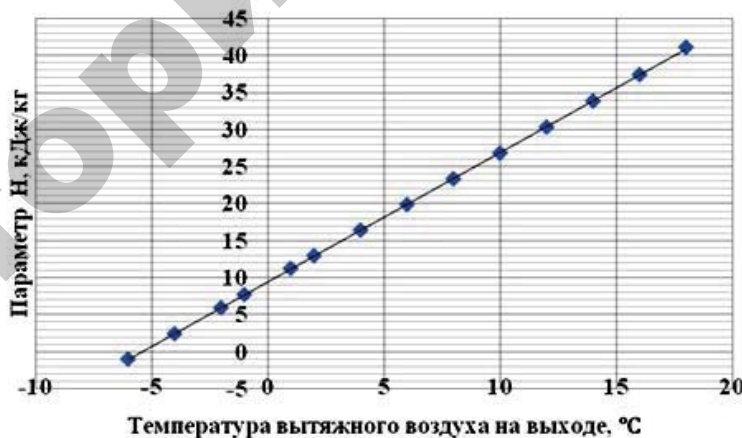


Рисунок 1. Параметр  $H$  в зависимости от температуры

на прямой линии при коэффициенте детерминации регрессии  $R^2 = 1$ .

После подстановки в уравнение (1) найденных коэффициентов  $a = 9,5$  кДж/кг и  $b = 1,745$  кДж/(кг·°С), а также вышеприведенных значений коэффициентов  $c$  и  $d$ , была получена зависимость:

$$h = 9,5 + 1,745t + 0,021t^2 + 0,0006t^3. \quad (3)$$

В интервале температур влажного насыщенного воздуха от «минус» 6 до «плюс» 18 °С ее погрешность не превышает 0,1 кДж/кг.

Ранее было показано, что существует лишь одно решение уравнений теплового баланса, теплопереда-

чи и тепловой эффективности КТУ, позволяющее найти значение коэффициента влаговыпадения [12]. Полученный вывод может быть распространен и на температуру вытяжного воздуха на выходе КТУ, искомым значение которой является решением системы уравнений теплового расчета КТУ.

Исходными данными к расчету температуры вытяжного воздуха на выходе КТУ были приняты:

– параметры вытяжного воздуха на входе в КТУ: температура  $t_1'$ , °С, относительная влажность  $\phi$ , %, энтальпия  $h_1'$ , кДж/кг и температура точки росы  $t_{1,p}$ , °С;

– температура приточного воздуха на входе в КТУ  $t_2'$ , °С;

– число единиц переноса (ЧЕП) при «сухом» теплообмене  $N_0$ .

Следует отметить, что ЧЕП при «сухом» теплообмене достаточно полно характеризует возможности передачи теплоты в КТУ и при «мокроем» теплообмене.

В таблице 1 приведены использованные в расчетах параметры вытяжного воздуха применительно к вентиляции помещений производственных, жилых и административных зданий.

**Таблица 1. Параметры вытяжного воздуха на входе в КТУ**

Номер варианта	$t_1'$ , °С	$\phi$ , %	$h_1'$ , кДж/кг	$t_{1,p}$ , °С
1	22	70	52	16,3
2	18	75	43	13,5
3	18	60	37,9	10,1
4	18	50	34,6	7,4
5	10	75	24,7	5,7
6	15	75	35,5	10,7

Температура приточного воздуха на входе в КТУ была принята равной следующим значениям: 0, -5, -10, -15, -20 и -25 °С.

Значения ЧЕП при «сухом» теплообмене задавались в пределах от 0,5 до 1,5 с учетом влияния геометрических и режимных параметров на эффективности работы КТУ [13].

Алгоритм метода итераций при нахождении температуры вытяжного воздуха содержит следующие этапы:

1. Принимают температуру вытяжного воздуха  $t_1'$ , °С, на выходе КТУ в интервале температур от  $t_2'$  до  $t_{1,p}$ .

2. Рассчитывают:  
– энтальпию насыщенного вытяжного воздуха  $h_1''$ , кДж/кг на выходе КТУ по уравнению (3);  
– коэффициент влаговыпадения

$$\xi = \frac{h_1' - h_1''}{c_{p1}(t_1' - t_1'')},$$

где  $c_{p1}$  – удельная теплоемкость вытяжного воздуха, кДж/(кг·°С);

– ЧЕП с учетом влияния выпадения влаги на теплообмен

$$N = \xi^{0,64} N_0;$$

– отношение водяных эквивалентов приточного и вытяжного воздуха

$$w = 0,96 / \xi.$$

Расчет отношения водяных эквивалентов произведен при условии равенства массовых расходов приточного и вытяжного воздуха с использованием удельных изобарных теплоемкостей: вытяжного воздуха  $c_{p1} = 1,05$  кДж/(кг·°С) и приточного воздуха  $c_{p2} = 1,01$  кДж/(кг·°С)

3. Находят:

– параметр  $\Gamma$  [14]

$$\Gamma = 1 - \exp(-Nw);$$

– коэффициент эффективности [14]

$$\varepsilon = 1 - \exp(-\Gamma / w).$$

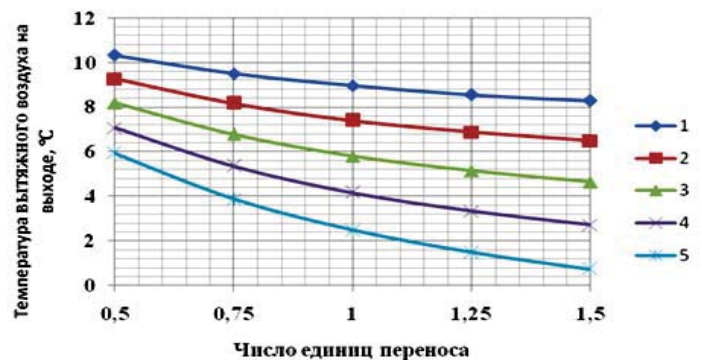
4. Рассчитывают температуру вытяжного воздуха на выходе из КТУ

$$t_1'' = t_1' - w\varepsilon(t_1' - t_2'). \quad (4)$$

Допустимая погрешность в расчете температуры по уравнению (4) по сравнению с ранее принятым значением температуры принята равной 0,1°С.

Данные, для которых  $t_1'' > t_{1,p}$ , исключались из рассмотрения.

Результаты расчета приведены на рисунках 2 и 3. Температура вытяжного воздуха на выходе из КТУ зависит от значения ЧЕП, от температуры поступающего приточного воздуха и параметров вытяжного воздуха на входе в КТУ.



**Рисунок 2. Температура вытяжного воздуха на выходе КТУ при его параметрах на входе  $t_1' = 15$  °С и  $\phi = 75\%$ :  
1 -  $t_2' = 0$  °С; 2 -  $t_2' = -5$  °С; 3 -  $t_2' = -10$  °С; 4 -  $t_2' = -15$  °С;  
5 -  $t_2' = -20$  °С**

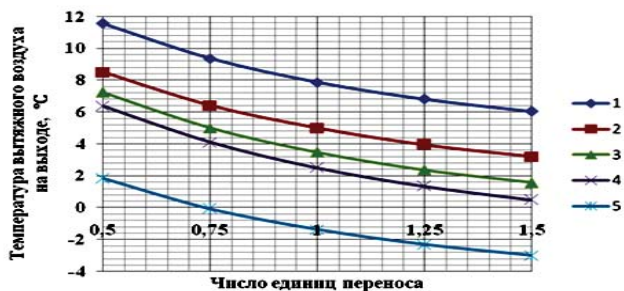


Рисунок 3. Изменение температуры вытяжного воздуха на выходе КТУ при  $t_{2'} = -20$  °С: номера рядов точек соответствуют номерам вариантов параметров вытяжного воздуха на входе в КТУ (табл. 1)

Если состояние приточного воздуха при низких температурах можно охарактеризовать одним параметром – его температурой, то состояние вытяжного воздуха, поступающего в КТУ, характеризуется двумя параметрами.

Это подтверждается данными рисунка 3, когда при одной и той же температуре в 18°С, но при разных относительных влажностях вытяжного воздуха на входе в КТУ (ряды точек 2, 3 и 4), наблюдаются разные температуры вытяжного воздуха на выходе КТУ.

Для состояния вытяжного воздуха на входе в КТУ представляется оправданным использовать температуру воздуха и температуру точки росы в качестве параметров поступающего в КТУ вытяжного воздуха. Это оказывается наиболее удобным при характеристике температурного фактора в тепловом режиме КТУ.

С учетом полученных результатов, искомая функциональная зависимость имеет следующий вид:

$$t_1'' = f(t_1'; t_{1,p}; t_2'; N_0). \quad (5)$$

Отсутствие коэффициента влаговыведения в зависимости (5) объясняется тем, что коэффициент влаговыведения также зависит от перечисленных в правой части формулы (8) параметров. Задавая их, можно определить и температуру вытяжного воздуха на выходе, и коэффициент влаговыведения в КТУ.

Полученную зависимость можно упростить введением относительных избыточных температур:

$$\theta_1 = f(\theta_2; N_0),$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – относительные избыточные температуры:

$$\theta_1 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_{1,p}} \text{ и } \theta_2 = \frac{t_1' - t_{1,p}}{t_1' - t_2'}$$

При этом первая из них содержит искомую температуру и является определяемым параметром, а вторая – эта определяющий параметр, она характеризует тепловой режим работы КТУ.

При постоянном значении ЧЕП устанавливается зависимость между относительными избыточными температурами (рис. 4).

Расчетные точки получены при вышеуказанных температурах приточного воздуха на входе в КТУ от 0 до «минус» 25 °С.

При построении графика на рисунке 4 использованы данные, для которых  $\theta_1 \geq 1$ .

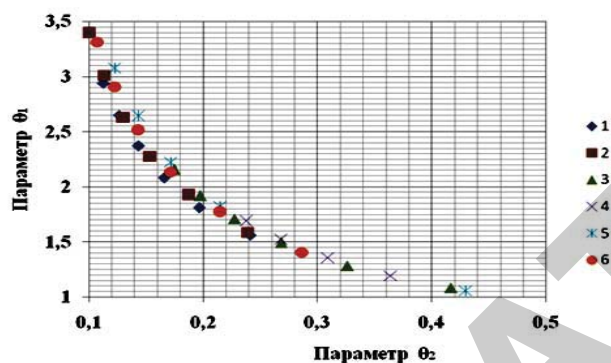


Рисунок 4. Относительные избыточные температуры при  $N_0 = 1$ : номера рядов точек соответствуют номерам вариантов параметров вытяжного воздуха на входе в КТУ (табл. 1)

Точки располагаются на кривой, соответствующей степенной зависимости:

$$\theta_1 = C(\theta_2)^m. \quad (6)$$

Значения коэффициента  $C$  и показателя степени  $m$  должны быть определены в зависимости от значения ЧЕП при обобщении данных о температуре вытяжного воздуха на выходе из КТУ.

Используя данные о значениях  $\theta_1$ , расчет температуры вытяжного воздуха на выходе из КТУ выполняется как

$$t_1'' = t_1' - \theta_1(t_1' - t_{1,p}). \quad (7)$$

Преобразование уравнения (6) в линейную зависимость с целью дальнейшего использования метода наименьших квадратов может быть выполнено методом логарифмирования

$$\ln \theta_1 = \ln C + m \ln \theta_2. \quad (8)$$

В таком случае имеем:

$$Y = a + bX, \quad (9)$$

где  $Y = \ln \theta_1$ ;  $a = \ln C$ ;  $b = m$ ;  $X = \ln \theta_2$ .

На рисунке 5 показаны расчетные точки, характе-

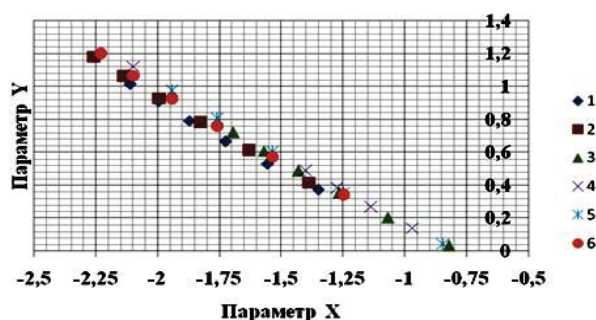


Рисунок 5. Зависимость между натуральными логарифмами относительных избыточных температур при  $N_0 = 1$ : номера рядов точек соответствуют номерам вариантов параметров вытяжного воздуха на входе в КТУ (табл. 1)

ризирующие температуру вытяжного воздуха на выходе КТУ при значении  $N_0 = 1$ . Координаты точек выражены с использованием параметров X и Y. При построении этих точек использованы результаты расчета для шести вариантов параметров вытяжного воздуха на входе в КТУ (табл. 1) при шести вариантах задания температуры приточного воздуха на входе в КТУ.

На основе метода наименьших квадратов было установлено, что при значении  $N_0 = 1$  в уравнении (9) коэффициент  $a = -0,664$ , а угловой коэффициент  $b = -0,81$ . При этом коэффициент детерминации  $R^2 = 0,988$ , что подтверждает наличие тесной связи между относительными избыточными температурами.

Согласно введенным к уравнению (9) обозначениям, находим, исходя из зависимости (6), расчетное уравнение при значении  $N_0 = 1$ :

$$\theta_1 = 0,515(\theta_2)^{-0,81}. \quad (10)$$

Расчет температуры вытяжного воздуха на выходе КТУ с использованием уравнений (7) и (10) имеет погрешность не более  $0,8^\circ\text{C}$ , что удовлетворяет требованиям к инженерному расчету КТУ.

Уравнение (10) допустимо применять при  $N_0 = 1$  в интервале значений относительной избыточной температуры  $\theta_2$  от 0,1 до 0,45.

#### Заключение

Научное и практическое значение выполненного исследования состоит в разработке методики теплового расчета параметров вытяжного воздуха на выходе из КТУ в системах вентиляции с учетом влияния влаговываждения на процессы теплообмена.

Получено уравнение (3) для расчета энтальпии вытяжного воздуха на выходе из КТУ как насыщенного влажного воздуха в зависимости от его температуры.

Предложен алгоритм, использующий итерации для расчета конечной температуры вытяжного воздуха, приведены ее расчетные значения при характерных параметрах вытяжного и приточного воздуха на входе в КТУ, найдена и обоснована структура зависимости для расчета конечной температуры вытяжного воздуха. Дана расчетная зависимость (10) при значении ЧЭП  $N_0 = 1$ .

Результаты исследований подтверждают достоверность метода расчета температуры вытяжного воздуха на выходе из КТУ с использованием относительных избыточных температур, одна из которых  $\theta_1$  является определяемой, а другая  $\theta_2$  – определяющей. Первая из них содержит искомую температуру, а вторая – температуры, характеризующие состояние вытяжного и приточного воздуха на входе в КТУ.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справоч. серия в 4-х кн. / А. М. Бакластов [и др.]; под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. –

2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – Кн. 4. – 588 с.

2. Голубков, Б. Н. Проектирование и эксплуатация установок кондиционирования воздуха и отопления / Б. Н. Голубков, Т. М. Романова, В. А. Гусев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 190 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. Куновский, В. И. Использование низкопотенциальной тепловой энергии в системах теплогазоснабжения и вентиляции / В. И. Куновский, Г. А. Могилат. – Минск: БПИ, 1984. – 78 с.

5. Аверкин, А. Г. Примеры и задачи по курсу «Кондиционирование воздуха и холодильные машины» / А. Г. Аверкин. – М.: АСВ, 2003. – 126 с.

6. Староверов, И. Г. Внутренние санитарно-технические устройства. Вентиляция и кондиционирование воздуха / И. Г. Староверов. – М.: Стройиздат, 1978. – Ч. 2. – 509 с.

7. Справочник по теплоснабжению и вентиляции: в 2-х кн. / Р. В. Щекин [и др.]. – Киев: Будівельник, 1976. – Кн. 2. – 352 с.

8. Быков, А. В. Теплообменные аппараты, приборы автоматизации и испытания холодильных машин / А. В. Быков. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 248 с.

9. Холодильные машины / Н. Н. Кошкин [и др.]; под общ. ред. И. А. Сакуна. – Ленинград: Машиностроение, 1985. – 510 с.

10. 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.

11. Теплофизические основы получения искусственного холода: справоч. / Н. А. Бучко [и др.]; под ред. А. В. Быкова. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 231 с.

12. Цубанов, А. Г. К расчету влаговываждения в кожухотрубчатых теплоутилизаторах систем вентиляции / А. Г. Цубанов, А. Л. Синяков, И. А. Цубанов // Агропанорама, 2016. – №1. – С. 35-38.

13. Цубанов, А. Г. Влияние геометрических и режимных параметров на эффективность кожухотрубчатых теплоутилизаторов / А. Г. Цубанов, А. Л. Синяков, И. А. Цубанов // Агропанорама, 2015. – №6. – С. 23-26.

14. Кэйс, В. М. Компактные теплообменники / В. М. Кэйс, А. Л. Лондон. – Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. – 160 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 26.07.2016