

Экспериментальное исследование регенеративного теплообменника и анализ тепловых процессов

Васильев В. А. vasiahat@email.ru, Каменецкий К.К. bigben.spb@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий

Представлены результаты исследования тепловых процессов двух регенеративных теплоутилизаторов. Вентилятор, в обеих конструкциях одинаковый, с возможностью изменения направления подачи воздуха, геометрические и теплофизические параметры регенеративной насадки разные. Получены численные значения коэффициентов регенерации/аккумуляции для теплого и холодного времени года для двух установок. Сформулированы рекомендации по согласованию характеристик вентилятора и насадки.

Ключевые слова: регенеративный теплообменник, теплоутилизатор, термическая эффективность регенератора, коэффициент регенерации/аккумуляции.

К числу важных проблем, стоящих перед разработчиками систем вентиляции, относится проблема экономии энергоресурсов.

Потери энергии, связанные с удаляемым теплым воздухом при вентиляции бытовых и жилых помещений, составляют до 70% всех затрат на отопление и вентиляцию. Поэтому проблема утилизации тепловой энергии воздуха, удаляемого из помещений при вентиляции, является крайне актуальной.

Одним из наиболее перспективных технических решений этой проблемы является применение в системах вентиляции стационарных переключающихся регенеративных теплоутилизаторов (СПРТ).

Данный тип утилизатора предназначен для установки в жилых и офисных помещениях. Регенератор состоит из теплоизолированного цилиндрического корпуса, в котором установлена регенеративная насадка и реверсивный осевой вентилятор. Через определенные промежутки времени происходит переключение подачи воздуха с прямой на реверсивную, что позволяет регенеративной насадке сначала накопить теплоту, а затем отдать ее воздуху, попадающему в помещение извне. Принципиальная конструкция СПРТ представлена на рис. 1.

аккумулятивной насадкой — $Q'_{ак}$ за период времени $\tau_{ак}$ и теплоте регенерируемой насадкой — $Q'_{рег}$ за период времени $\tau_{рег}$.

Регенерируемая и аккумулятивная теплота вычисляются по следующим формулам:

$$Q_{рег} = \left(\int_0^{\tau_{рег}} T_{II}(\tau) d\tau - T_{out} \tau_{рег} \right) G_{рег} c_v, \quad (1)$$

$$Q_{ак} = \left(T_{in} \tau_{ак} - \int_0^{\tau_{ак}} T_I(\tau) d\tau \right) G_{ак} c_v, \quad (2)$$

где $G_{ак}$ — расход воздуха на этапе аккумуляции; $G_{рег}$ — расход воздуха на этапе регенерации; $Q_{рег}$ — регенерированная теплота; $Q_{ак}$ — аккумулятивная теплота; c_v — удельная теплоемкость воздуха.

Максимальное количество теплоты, которое может быть аккумулятивно и регенерировано за время τ_y пропорционально площади $(T_{in} - T_{out}) \tau_y$, поэтому коэффициент регенерации $K_{рег}$ и коэффициент аккумуляции $K_{ак}$ вычисляются по формулам:

$$K_{рег} = \frac{\int_0^{\tau_{рег}} T_{II}(\tau) d\tau - T_{out} \tau_{рег}}{(T_{in} - T_{out}) \tau_{рег}}; \quad (9)$$

$$K_{ак} = \frac{T_{in} \tau_{ак} - \int_0^{\tau_{ак}} T_I(\tau) d\tau}{(T_{in} - T_{out}) \tau_{ак}}. \quad (10)$$

В общем случае длительность циклов регенерации и аккумуляции может быть разной. То же самое можно сказать и относительно расходов воздуха в этих циклах.

Ниже приведены результаты исследования регенеративных теплоутилизаторов УВРК-30 (производитель НПФ «Экотерм», РФ) и inVENTer (производитель Германия), отличающихся друг от друга только, материалом и геометрией насадок. Конструктивные и теплофизические параметры обеих насадок приведены в таблице №1 и на рис. 3. Продолжительность цикла, за которое принять время подачи воздуха в одном направлении, у регенераторов одинаково и составляет семьдесят секунд.

Таблица №1. Геометрические и теплофизические параметры регенеративных насадок.

Параметр насадки	Обозначение	Ед. измерения	Образец	
			УВРК-30	inVENTer
Форма поперечного сечения насадки	—	—	круг	квадрат
Определяющий размер поперечного сечения	d, a	м	диаметр 0,175	сторона 0,136
Плотность материала насадки	ρ	кг/м ³	1400	2200
Теплоемкость материала насадки	$C_p(n)$	Дж/(кг К)	2000	900
Коэффициент теплопроводности материала насадки	λ	Вт/(м К)	0,4	1,4
Длина насадки	l	м	0,175	0,15
Количество каналов в насадке	n	—	2300	900

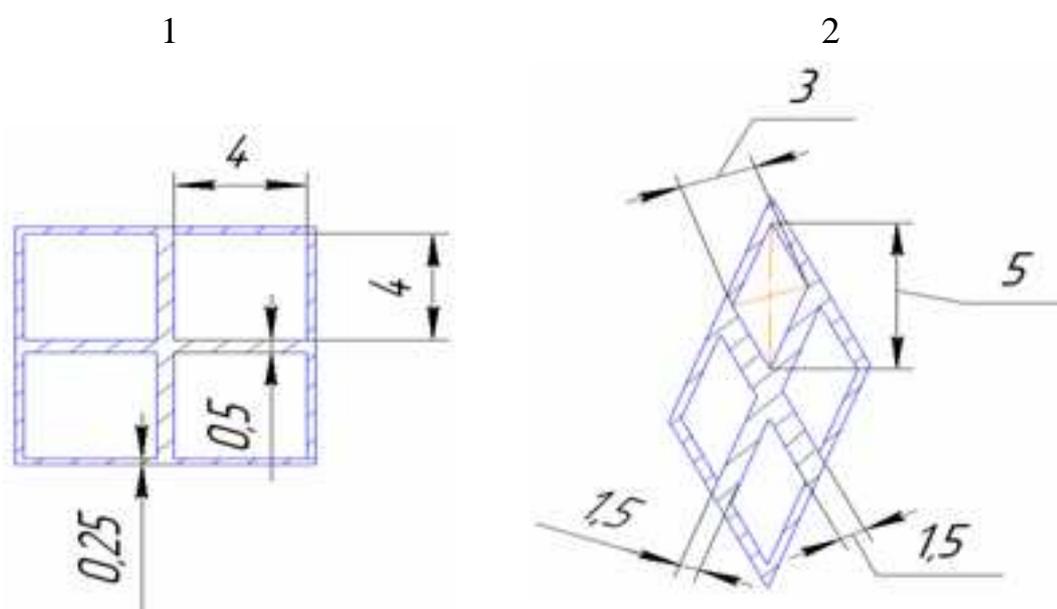


Рис. 3. Поперечное сечение каналов насадки. Где: 1 — насадка регенератора inVENTer, 2 — насадка регенератора УВРК-30.

В обеих конструкциях использовался одинаковый осевой реверсивный вентилятор 4312GL фирмы embraer, основные параметры которого показаны в таблице №2.

Вентилятор, установленный в регенераторах работает на трех скоростях вращения, которые отличаются от номинальной — паспортной. Частоты вращения были измерены при работе вентилятора без нагрузки с помощью измерительного комплекса, в состав которого входили светодиодный датчик, приемник сигнала и осциллограф Tektronix TDS 2014B.

Таблица №2. Основные параметры вентилятора.

Параметр	Значение
Диаметр рабочего колеса	0,12м
Диаметр ступицы	0,05м
Ширина рабочего колеса	0,032м
Количество лопаток	5шт
Максимальный расход воздуха	93м3/час
Номинальная частота вращения	1550 об/мин
Напряжение питания	6...15 В
Диапазон рабочей температуры	от -20 до +75°С
Номинальная мощность	1,2 Вт

Основной геометрической характеристикой насадки является коэффициент действительного проходного сечения:

$$\xi = S_{\text{прох}}/S_{\text{общ}} \quad (5)$$

где $S_{\text{прох}}$ — суммарная площадь проходного сечения каналов, $S_{\text{общ}}$ — общая площадь поперечного сечения насадки; $\xi = 0,7785$ для регенератора inVENTer; $\xi = 0,4827$ для регенератора УВРК-30.

Экспериментальный стенд представляет собой трубу диаметром 125 мм, внутри которой установлен регенеративный теплоутилизатор. Теплоутилизатор изолирован от внешних источников теплоты дополнительным слоем изоляции. На исследуемой установке закреплено по два датчика температуры: у выхода воздушного потока в помещение (внутренние датчики) и два снаружи у входа воздушного потока в регенератор (внешние датчики). Сигналы от датчиков температуры идут на аналого-цифровой преобразователь L-card E 14-140, который снимает показания в реальном времени и затем передает их на компьютер. Методика испытаний состояла в следующем: на трех различных скоростях вращения вентилятора происходил замер температур во входном и выходном сечениях регенератора. Время измерения составило 700 секунд — это 10 циклов по 70 секунд. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 4.

По результатам измерения температур были построены графики изменения температуры воздушного потока в торцевых сечениях регенератора от времени. Для регенератора inVENer, результаты эксперимента представлены на рис. 5–7. Для УВРК-30 результаты представлены на рис. 8–10.

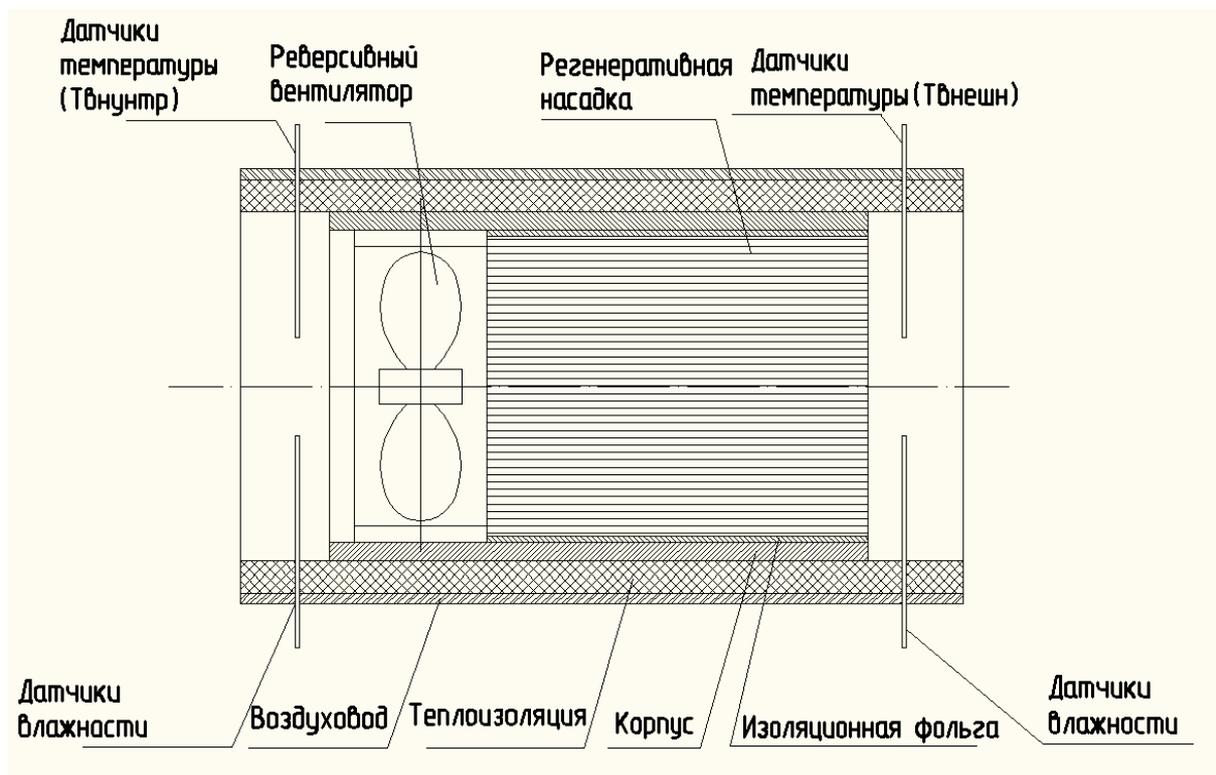


Рис. 4. Схема экспериментального стенда.

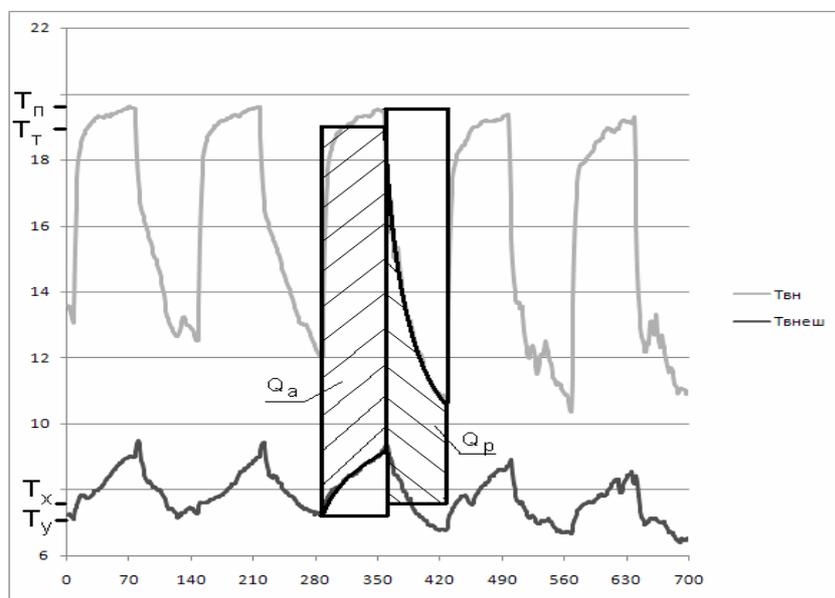


Рис. 5. Температура в торцевых сечениях регенератора inVENTer (первая скорость).

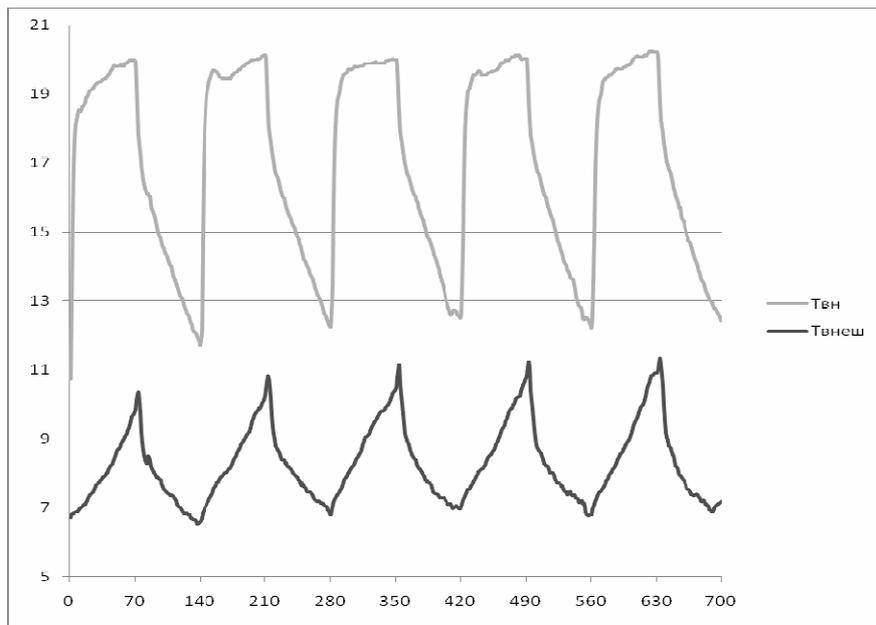


Рис. 6. Температура в торцевых сечениях регенератора inVENTer (вторая скорость).

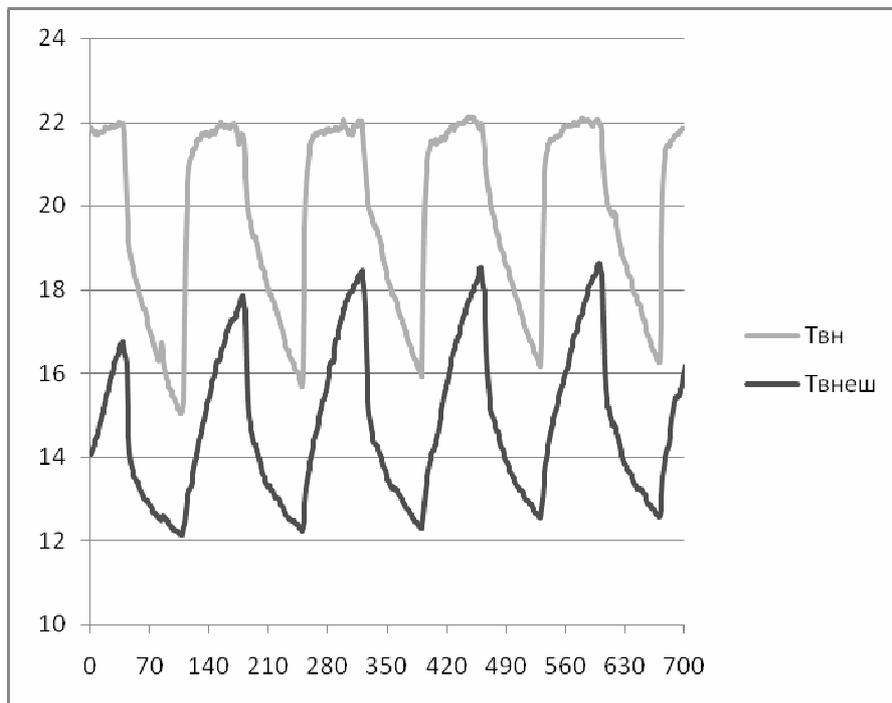


Рис. 7. Температура в торцевых сечениях регенератора inVENTer (третья скорость).

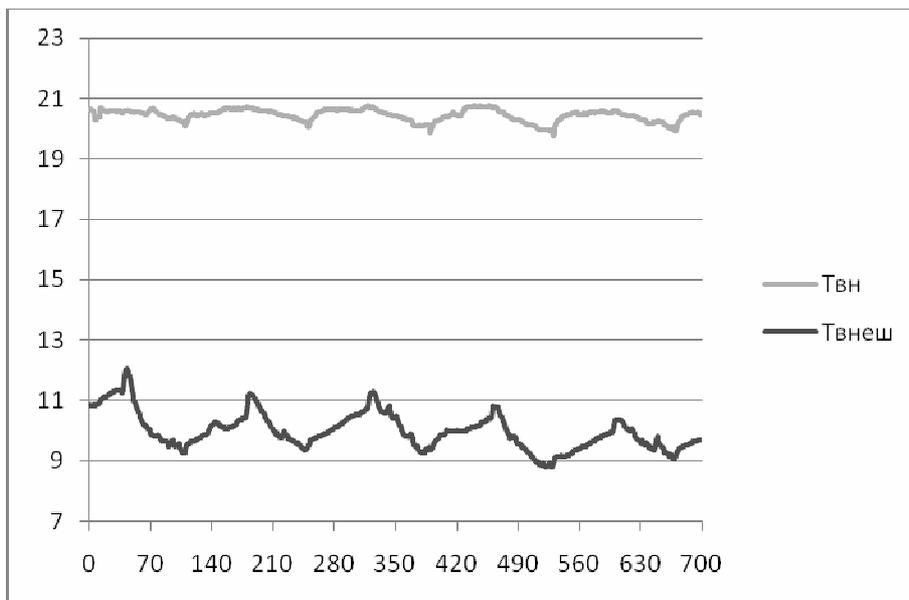


Рис. 8. Температура в торцевых сечениях регенератора УВРК-30 (первая скорость).

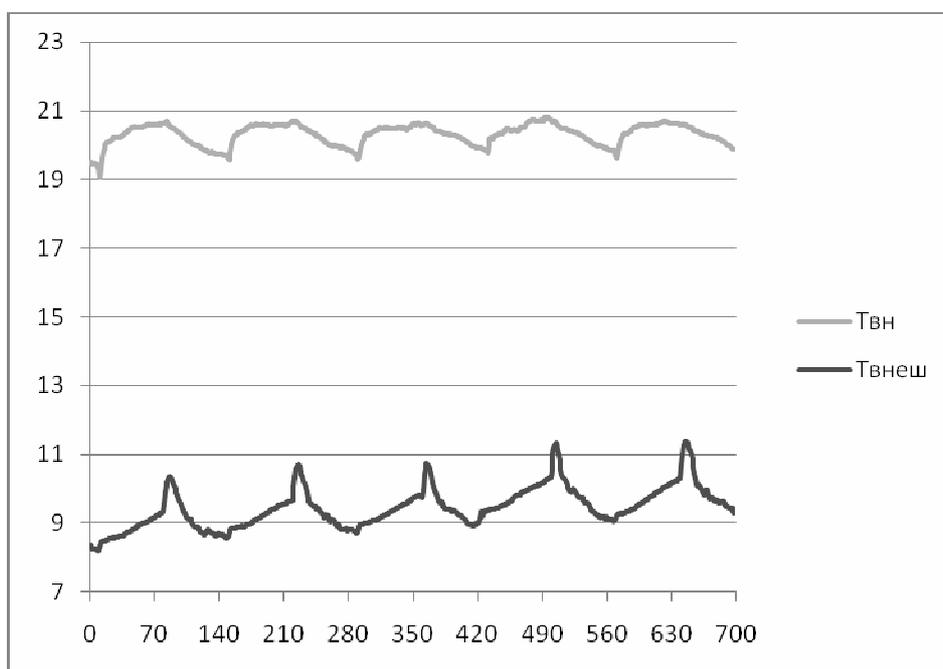


Рис. 9. Температура в торцевых сечениях регенератора УВРК-30 (вторая скорость).

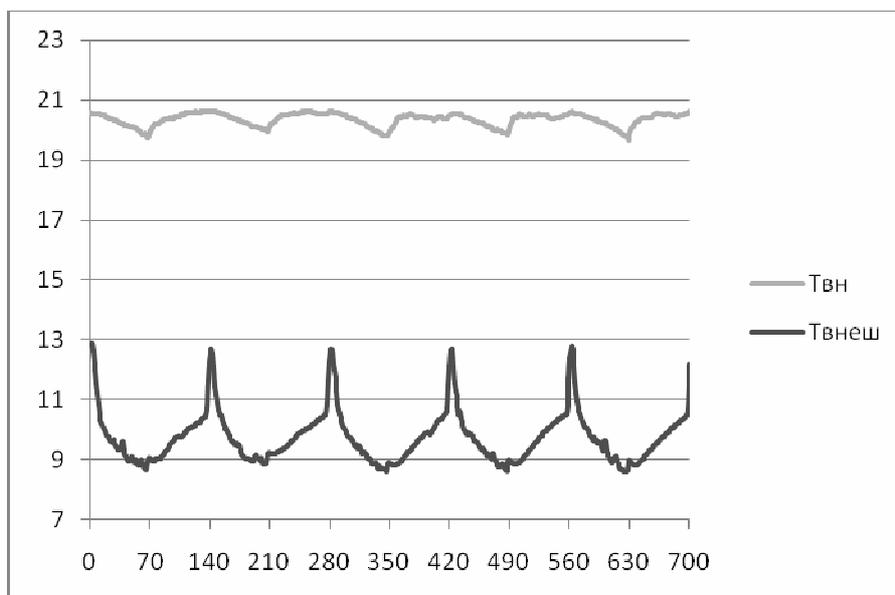


Рис. 10. Температура в торцевых сечениях регенератора УВРК-30 (третья скорость).

При смене направления движения воздуха в утилизаторе температура в одном из сечений изменяется по криволинейной зависимости, а в другом сечении после резкого скачка остается неизменной и равной температуре помещения. Вследствие тепловой инерции датчиков температуры и неполной ассимиляции свежего воздуха, попадающего в помещение, вместо участка с постоянной температурой образуется участок с криволинейным изменением температуры. Для адаптации расчетной модели заменим криволинейный участок гистограммы прямолинейным с температурой равной средней на криволинейном участке, как показано на рис. 11.

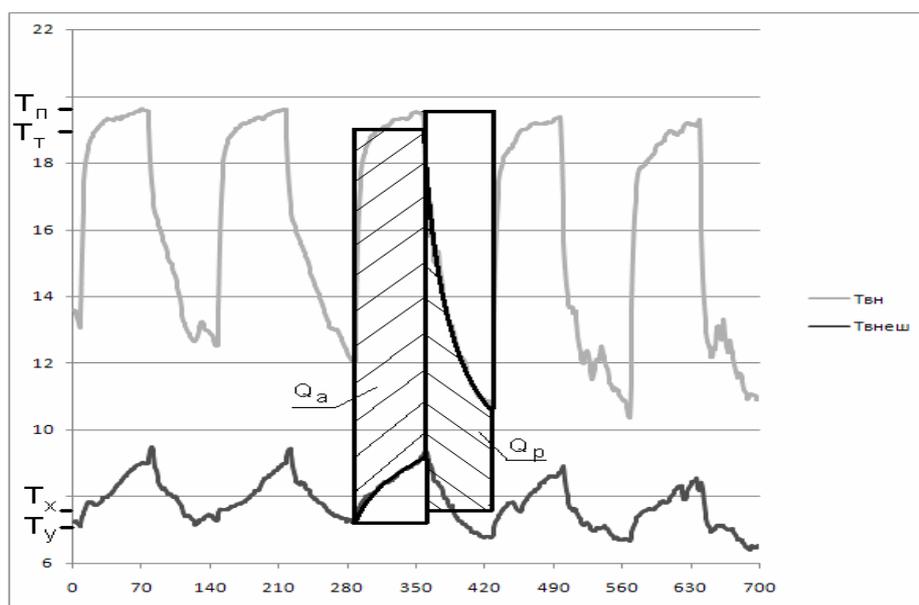


Рис. 11. Адаптированная модель расчета коэффициента регенерации/аккумуляции.

На основе данной модели были рассчитаны коэффициенты регенерации и аккумуляции, которые представлены в таблице №3 и были получены при температуре наружного воздуха -8°C и температуры в помещении 17°C .

Таблица №3. Коэффициенты регенерации и аккумуляции.

Величина	Скорость вентилятора					
	1		2		3	
	УВПК-30	in-VENTer	УВПК-30	in-VENTer	УВПК-30	inVENTer
Коэффициент регенерации	0,654	0,624	0,603	0,487	0,547	0,447
Коэффициент аккумуляции	0,912	0,763	0,881	0,596	0,887	0,524

Исследования также проводились и в теплый период года, когда температура наружного воздуха составляет 8°C , а в помещении 21°C , а расчетные значения коэффициентов регенерации/аккумуляции представлены в таблице №4.

Таблица №4. Коэффициенты регенерации и аккумуляции для теплого периода года.

Величина	Скорость вентилятора					
	1		2		3	
	УВПК-30	in-VENTer	УВПК-30	in-VENTer	УВПК-30	inVENTer
Коэффициент регенерации	0,675	0,645	0,616	0,505	0,576	0,454
Коэффициент аккумуляции	0,920	0,776	0,904	0,611	0,875	0,516

При анализе значений коэффициентов видно, что коэффициент регенерации у теплоутилизатора УВПК-30 больше, чем у регенератора inVENTer, на всех скоростях подачи воздуха. Высокие значения коэффициента регенерации у теплоутилизатора УВПК-30 обусловлено меньшим значением коэффициента

действительного проходного сечения. С увеличением коэффициента проходного сечения уменьшается интенсивность теплообмена в теплоиспользующей насадке, а расход воздуха увеличивается вследствие уменьшения аэродинамического сопротивления. В установке немецкого производства большие значения расхода воздуха на второй и третьей скорости приводят к превышению допустимых значений скорости в помещении. Существенное отличие коэффициента регенерации от коэффициента аккумуляции обуславливается неравенством расходов воздуха при прямом и обратном цикле. Неравенство расходов возникает из-за разного напора, создаваемого вентилятором при прямой и обратной подаче, вследствие несимметричного профиля лопаток вентилятора. Улучшить эффективность работы теплоутилизаторов можно путем выравнивания расходов воздуха на всасывание и нагнетание. Этого можно достигнуть путем изменения скорости вращения лопастей вентилятора, изменением продолжительности циклов аккумуляции/регенерации, либо изменением профиля лопаток на симметричный.

Увеличение коэффициента регенерации с увеличением скорости обуславливается увеличением коэффициента теплоотдачи α , который напрямую зависит от скорости потока. Чем меньше скорость, тем больше дисбаланс между коэффициентом регенерации и аккумуляции, и тем меньше теплосъем с регенеративной насадки.

Список литературы.

1. СНиП 31-01-2003. "Жилые здания".
2. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, при прямотоке и перекрестном токе. Пер. с нем. — М.: Энергоиздат, 1981. — 384 с.
3. Сайт производителя вентилятора www.embpapst.com.

Experimental study of a regenerative heat exchanger and analysis of thermal processes

Vasiliyev V.A. vasiahat.@email.ru, Kamenetskiy K.K. bigben.spb@mail.ru

Saint-Petersburg state university of refrigeration and food engineering

Regenerative heat exchangers with different regenerative cartridges are the objects of the heat research in this article. These regenerative cartridges are made of a different material. They are of a different form and also they have different areas of passage. Fan, which is used in regenerative heat exchangers is the same for both. It has a possibility for reverse operating. During the experimental research the regenerating/accumulating coefficient which shows the thermal efficiency of these heat exchangers was measured. Also the conclusions of corresponding fan and regenerative cartridge are given in this article.

Keywords: Regenerative heat exchanger, thermal efficiency, regenerating/accumulating coefficient.