

# Параметрическое исследование регенеративного теплообменника

В. А. ВАСИЛЬЕВ, А. И. ГАВРИЛОВ, К. К. КАМЕНЕЦКИЙ, Е. В. СОБОЛЬ

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

**A regenerative heat exchanger by "inVENTer Company" is the object of the research in this paper. Its engineering design and operating principal are elaborately described. The diagrams involved show the relationships between the coefficient of regeneration, used as a measure of heat transfer efficiency, and main thermal, control and design characteristics of the heat exchanger; recommendations on the choice of these parameters being listed.**

**Key words:** regenerative heat exchanger, coefficient of regeneration, hydraulic resistance, heat capacity.

**Ключевые слова:** регенеративный теплоутилизатор, коэффициент регенерации, гидравлическое сопротивление, теплоемкость.

В последнее время рост стоимости энергетических ресурсов и повышение требований к качеству жизни [1] существенно обострили проблему сокращения затрат на отопление и вентиляцию бытовых и производственных помещений. Одним из решений данной задачи является использование локальных систем вентиляции с утилизацией теплоты удаляемого из помещения воздуха. Важная роль в таких системах отведена регенеративному теплоутилизатору, который и станет главным объектом параметрического исследования, представленного в этой статье.

Наиболее распространенным теплоутилизатором является стационарный регенеративный теплообменник (рис. 1). Он состоит из теплоизолированного корпуса, в который помещены насадка и осевой реверсивный вентилятор, способный циклически менять направление подачи воздуха.

В теплоутилизаторе насадка попеременно обдувается холодным и теплым воздухом. Циклическую смену направления подачи воздуха обеспечивает осевой вентилятор. При продувке теплым воздухом насадка воспринимает теплоту и аккумулирует ее. Через определенный промежуток времени происходит изменение направления поступления потока, и сквозь насадку начинает проходить холодный воздух, который уносит с насадки накопленную в предыдущем цикле теплоту. Таким образом, в регенераторах происходят циклический процесс аккумуляции теплоты удаляемого из помещения воздуха насадкой и последующая отдача этой теплоты холодному потоку воздуха, поступающему с улицы.

В системах вентиляции, как правило, устанавливают не меньше двух регенераторов, которые в помещении работают в противофазе. Когда один из них обеспечива-

ет приток, другой в это время работает на вытяжку, что способствует непрерывной вентиляции помещений.

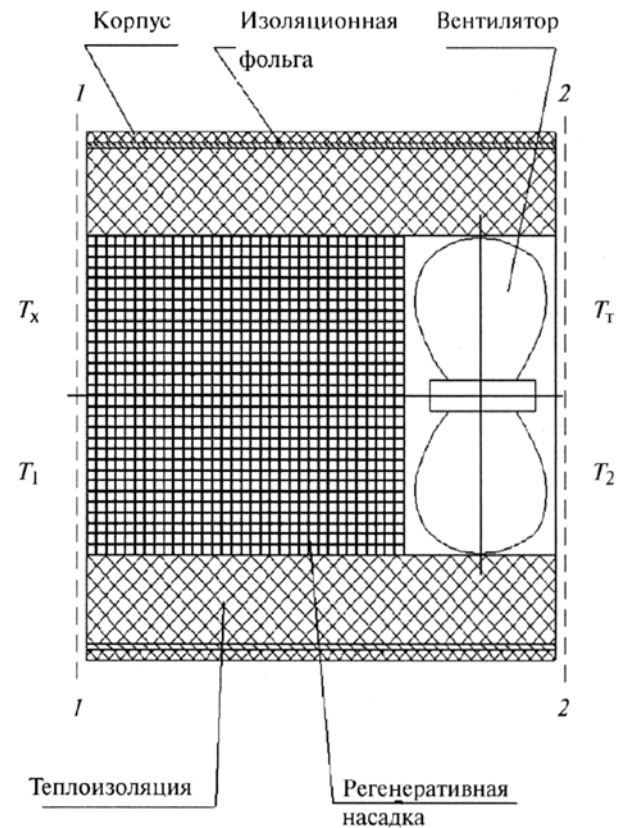


Рис. 1. Конструкция регенеративного теплообменника

Температура холодного потока —  $T_x$ , температура горячего потока —  $T_T$ ;  $T_1$  и  $T_2$  — мгновенные значения температуры воздуха в сечениях 1–1 и 2–2 соответственно.

Подбирая оптимальные режимные и конструктивные параметры теплоутилизаторов и их расположение в обслуживаемых помещениях, можно существенно сократить затраты на отопление и вентиляцию.

Показателем эффективности теплообмена между воздухом и насадкой в регенераторе теплоты является коэффициент регенерации. На рис. 2 показана диаграмма изменения температуры воздуха в торцевых сечениях регенератора при установившемся режиме работы.

Площади заштрихованных участков диаграммы пропорциональны теплоте, аккумулированной насадкой  $Q_a$ , и регенерируемой теплоте  $Q_p$ , которая передается от насадки холодному потоку за время цикла  $\tau_{ц}$ :

$$Q_p = \int_0^{\tau_{ц}} T_2(\tau) d\tau - T_x \tau_{ц}; \quad (1)$$

$$Q_a = T_T \tau_{ц} - \int_{\tau_{ц}}^{2\tau_{ц}} T_1(\tau) d\tau.$$

Максимальное количество теплоты, которое может быть аккумулировано и регенерировано за время  $\tau_{ц}$ , пропорционально площади  $(T_T - T_x)\tau_{ц}$ , поэтому коэффициент регенерации  $K_p$  и коэффициент аккумуляции  $K_a$  вычисляются по формулам

$$K_p = \frac{\int_0^{\tau_{ц}} T_2(\tau) d\tau - T_x \tau_{ц}}{(T_T - T_x)\tau_{ц}}; \quad K_a = \frac{T_T \tau_{ц} - \int_{\tau_{ц}}^{2\tau_{ц}} T_1(\tau) d\tau}{(T_T - T_x)\tau_{ц}}. \quad (2)$$

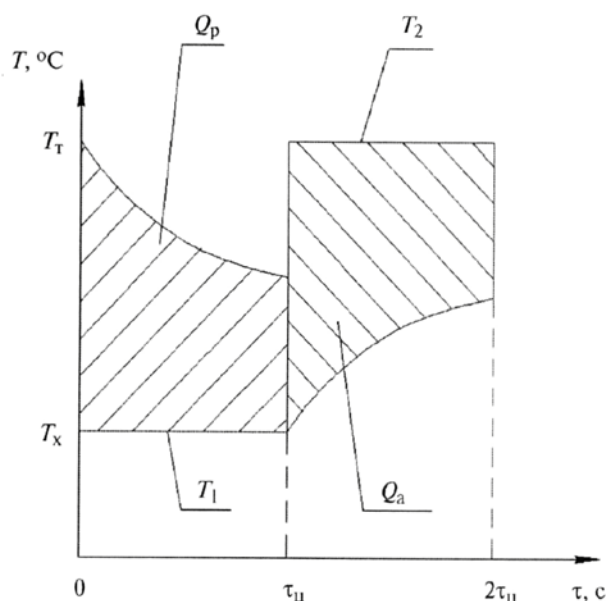


Рис. 2. Изменение температуры воздуха в торцевых сечениях регенератора

Так как корпус регенератора теплоизолирован, то можно полагать, что при установившемся тепловом режиме  $Q_p \approx Q_a$  и, следовательно,  $K_p \approx K_a$ .

Для расчета подынтегральных функций  $T_2(\tau)$  и  $T_1(\tau)$  использовался программный пакет Star-CD, в котором моделировался процесс теплообмена между насадкой и воздухом.

Конструктивные, режимные и теплофизические параметры регенеративного теплоутилизатора фирмы inVENTer приведены в таблице.

Параметр	Обозначение	Величина	Единица измерения
Объемный расход воздуха через насадку	$Q$	0,025	м <sup>3</sup> /с
Теплоемкость воздуха	$C_{p(в)}$	1005	Дж/(кг·К)
Плотность воздуха	$\rho$	1,29	кг/м <sup>3</sup>
Время цикла	$\tau$	70	с
Теплоемкость материала насадки	$C_{p(н)}$	900	Дж/(кг·К)
Плотность материала насадки	$\rho$	2200	кг/м <sup>3</sup>
Масса насадки	$m$	1,9	кг
Коэффициент теплопроводности материала насадки	$\lambda$	1,4	Вт/(м·К)
Длина насадки	$l$	0,15	м
Форма канала насадки — квадрат со стороной	$a$	0,004	м
Толщина стенки между каналами насадки	$\delta$	0,0005	м
Количество каналов в насадке	$n$	900	шт.
Площадь поверхности насадки	$S$	0,54	м <sup>2</sup>



На рис. 3–6 показаны полученные в результате расчета зависимости коэффициента регенерации от конструктивных, теплофизических и режимных параметров.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента регенерации от времени цикла. Из рисунка видно, что зависимость коэффициента регенерации от времени цикла имеет линейный характер. С ростом времени коэффициент регенерации уменьшается. Это обусловлено тем, что при увеличении времени цикла разность температур между стенкой насадки и воздухом уменьшается и, как следствие, падает интенсивность теплообмена. Также увеличение времени цикла приводит к тому, что насадка уже физически не может аккумулировать тепло и воздух просто проходит сквозь нее без изменения своей температуры. Таким образом, и эффективность теплоутилизатора как теплообменника стремится к нулю. Наоборот, слишком маленькое время цикла способствует интенсивному теплообмену, однако при этом воздух циркулирует только непосредственно в регенераторе по замкнутому циклу и не успевает покинуть его. Поэтому время цикла теплоутилизатора надо выбирать, исходя из условия обеспечения необходимой циркуляции свежего воздуха в помещении, чтобы регенеративная насадка успевала накопить максимальное количество теплоты за период для своей геометрии и физических параметров материала. Геометрию насадки выбирают на основании размеров помещения, необходимой кратности воздухообмена в нем и, соответственно, расхода воздуха через теплоутилизатор.

Зависимость коэффициента регенерации от длины канала насадки показана на рис. 4. Из рисунка видно, что зависимость коэффициента регенерации асимптотически стремится к постоянной величине. Рассматривать дальнейшее увеличение длины канала насадки нет смысла, так как мы рассматриваем установку теплоутилизатора в производственных и бытовых помещениях, где толщина наружной стены не превышает полуметра. Вид

кривой можно обосновать с той точки зрения, что интенсивность теплообмена на начальном участке, где разница между температурой стенки и температурой потока значительна, преобладает над интенсивностью теплообмена на отдаленном от входа участке, куда воздух попадает уже охлажденным, а интенсивность теплообмена падает. Также при увеличении длины регенератора растет и гидравлическое сопротивление, которое нужно преодолеть, чтобы протолкнуть воздух через каналы насадки. Следовательно, оптимальное значение длины канала насадки находится в пределах 0,4–0,5 м.

Зависимости коэффициента регенерации от теплоемкости и плотности материала насадки показаны на рис. 5. Из рисунка можно сделать вывод о том, что зависимости коэффициента регенерации от плотности и теплоемкости материала насадки имеют одинаковый характер изменения. При увеличении исходных параметров коэффициент регенерации в обоих случаях асимптотически увеличивается. Это очевидно, так как обе величины характеризуют способность материала накапливать тепло; следовательно, чем больше плотность и теплоемкость, тем больше тепла материал может накопить в себе. В диапазоне от 400 до 2200 кг/м<sup>3</sup> и от 500 до 2000 Дж/(кг·К) попадают такие материалы, как бумага, полиэтилен, полипропилен и керамика. Таким образом, для изготовления регенеративной насадки нужно выбирать материал с высокими значениями плотности и теплоемкости. Также выбор материала обуславливается технологией производства регенеративной насадки и финансовыми затратами на ее изготовление.

Зависимость коэффициента регенерации от теплопроводности материала показана на рис. 6. Из рисунка видно, что коэффициент теплопроводности материала в малой степени влияет на коэффициент регенерации насадки. В процессе аккумуляции (регенерации) теплоты наибольшую роль играет процесс вынужденной конвекции, а процесс внутреннего переноса теплоты по средствам теплопроводности несоизмеримо мал.

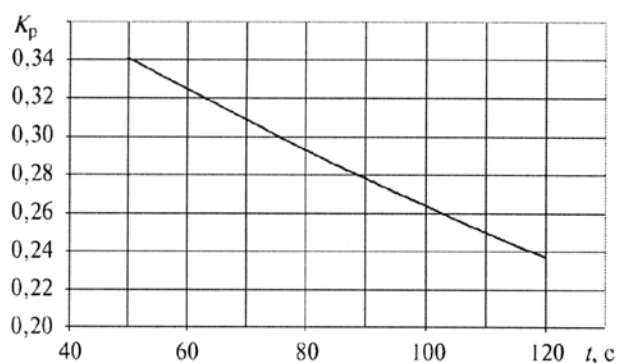


Рис. 3. Зависимость коэффициента регенерации от времени цикла

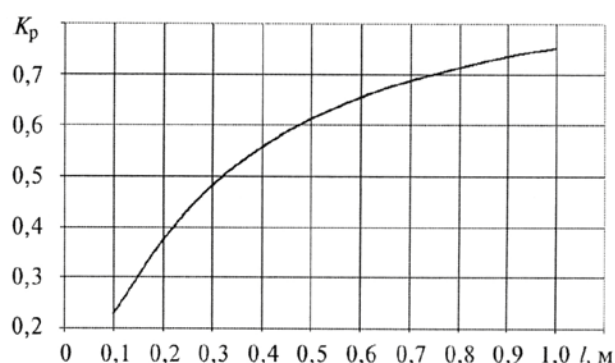


Рис. 4. Зависимость коэффициента регенерации от длины канала насадки

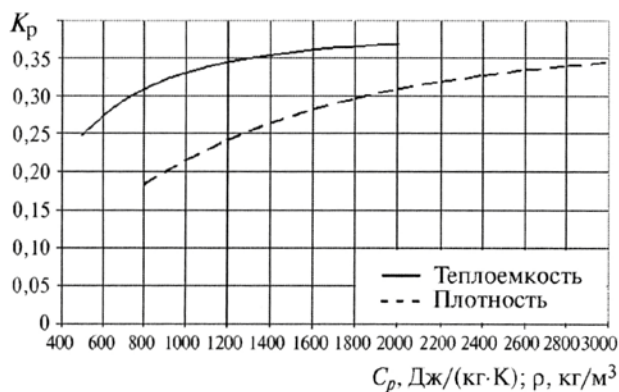


Рис. 5. Зависимость коэффициента регенерации от теплоемкости и плотности материала насадки

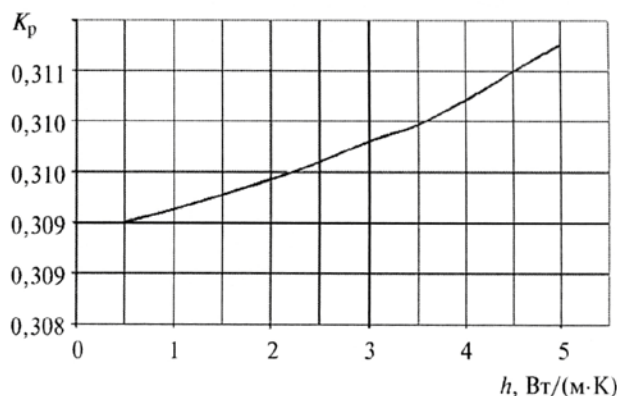


Рис. 6. Зависимость коэффициента регенерации от теплопроводности материала

Соотношение для коэффициента теплопередачи за цикл при равенстве периодов нагрева и охлаждения, а также равенстве соответствующих коэффициентов теплоотдачи [2]:

$$\frac{1}{k_0} = \frac{4}{\alpha} + \frac{4\delta\Phi}{\lambda_s}, \quad (3)$$

где

$$\Phi = \frac{1}{6} - 0,00556 \frac{\delta^2}{a\tau_{\text{ц}}}. \quad (4)$$

Из соотношения (3) видно, что время цикла не входит в выражение для коэффициента теплопередачи, но его косвенное влияние прослеживается через разность температур насадки и воздуха, определяющих интенсивность теплообмена.

Используя исходные данные [3], оценим порядок величин, входящих в выражение (3). При подстановке полученных результатов в (3) делаем вывод о том, что порядок второго слагаемого на три порядка меньше, чем слагаемого, содержащего в себе коэффициент теплоотдачи. Это показывает, что влияние коэффициента теплопроводности материала насадки на коэффициент регенерации мало и может не приниматься в расчет.

Выполнив параметрическое исследование регенеративного теплоутилизатора, можно сделать следующие выводы:

- время цикла регенератора определяется физическими свойствами и геометрией насадки, а также кратностью воздухообмена в помещении, т. е. расходом воздуха через теплоутилизатор. Оптимальное время цикла определяется способностью насадки накапливать максимальное количество теплоты во время теплообмена при заданных конструкции и режиме работы вентилятора. Для рассматриваемого регенератора оптимальное время цикла составляет 50–60 с;

- коэффициент регенерации теплоутилизатора прямо пропорционален длине канала насадки. Однако с увеличением длины канала уменьшается интенсивность теплообмена на отдаленном от входа участке насадки, а также растет гидравлическое сопротивление насадки. В большинстве случаев длина насадки регенератора ограничивается толщиной стены, в которой будет установлен теплообменник. Поэтому оптимальное значение длины канала для теплоутилизаторов бытовых и производственных помещений лежит в диапазоне 0,4–0,5 м;

- теплопроводность материала насадки не влияет на коэффициент регенерации потому, что теплоотдача при вынужденной конвекции на три порядка выше, чем передача теплоты по средствам внутренней теплопроводности материала;

- плотность и теплоемкость в одинаковой степени влияют на коэффициент регенерации. С ростом этих величин растет и коэффициент регенерации, поэтому при выборе материала для регенеративной насадки теплоутилизатора рекомендуется использовать материал с теплоемкостью от 1000 до 2000 Дж/(кг·К) и плотностью от 2000 до 3000 кг/м<sup>3</sup>.

## Список литературы

1. СНиП. 2.08.01–89. Жилые здания.
2. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, при прямотоке и перекрестном токе / Пер. с нем. — М.: Энергоиздат, 1981.
3. СИНЦ. Отчет № 5601–09 от 18.05.2009. Численные исследования процессов тепло- и массопереноса в теплообменнике регенеративного типа.