

УДК 697.978

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕРМОАККУМУЛИРУЮЩИХ СРЕДАХ*

И.В. МЕЗЕНЦЕВ¹, Н.В. ВЕРНИКОВСКАЯ², Ю.И. АРИСТОВ², В.А. МУХИН³

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск,

²Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск,

³Сибирский государственный университет путей сообщений,
Новосибирск

Представлены результаты экспериментального исследования реверсивного нестационарного теплообмена при фильтрации потока воздуха через неподвижную теплоаккумулирующую среду, в качестве которой использовали свинцовые ($D = 2,0, 3,5$ и $4,5$ мм) и стеклянные шары ($D = 3,2$ мм). Исследованное устройство имитировало циклические режимы регенерации теплоты в системе вентиляции бытовых и офисных помещений. Для исследованных засыпок измерена зависимость времени переключения потока от числа Рейнольдса. Разработана математическая модель процесса, описывающая теплообмен между газовым потоком и неподвижным слоем шаров. Хорошее согласование экспериментальных данных с расчетными наблюдается при больших числах Рейнольдса, в то время как при малых сказывается влияние тепловых потерь, в результате чего экспериментальное время переключения оказывается меньше расчетного.

ВВЕДЕНИЕ

Существуют определенные нестационарные режимы проведения каталитических реакций, значительно превосходящие по своей эффективности стационарные [1, 2]. Одним из способов реализации такого режима может быть переключение направления подачи газа в слой катализатора [3, 4]. Исследования [5, 6] показывают, что такая организация химических реакций позволяет удерживать зону с высокой температурой внутри зернистого слоя при низкой входной температуре. В этом случае наличие катализатора позволяет не только увеличивать скорость реакции, но и выполнять роль регенератора теплоты, т. е. дает возможность осуществлять химические реакции (например, окисление диоксида серы, синтез аммиака) без дополнительного подвода энергии. Реверсивные режимы без адсорбции газа или его химической реакции с материалом слоя исследуются в регенеративных теплообменниках для нагрева воздуха с непористыми теплоаккумулирующими элементами [7–11].

В настоящей работе экспериментальными и численными методами исследованы реверсивные режимы фильтрации воздуха через слой теплоаккумулирующей среды, в которых коэффициенты теплоотдачи от поверхности зерна имеют

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента (НШ 6526.2006.3), РФФИ (грант № 06-08-00982), фонда “Глобальная энергия” и программы “Энергосбережение СО РАН”.

невысокие значения, и термическое сопротивление на внешней поверхности является основным. Именно такие режимы реализуются в недавно предложенном устройстве для регенерации теплоты и влаги в системе вентиляции бытовых и офисных помещений [12].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Опыты проводили на установке, подробно описанной в [13]. Рабочий участок представлял собой полиэтиленовую трубу диаметром 210 мм и длиной 800 мм (рис. 1). Внутри трубы помещали кассеты с теплоаккумулирующим материалом — свинцовыми ($D = 2,0, 3,5$ и $4,5$ мм) и стеклянными ($D = 3,2$ мм) шарами. Общая длина слоя шаров составляла 166 мм. Источником воздуха служил сжатый воздух из лабораторной сети. Для создания потока холодного воздуха ($T = -5 \div -20$ °С) применяли трубку Ранка. Такая схема позволяла независимо регулировать температуру и объемную скорость воздуха на входе в устройство. Среднемассовую температуру воздуха измеряли хромель-копелевыми термопарами, показания которых автоматически регистрировали каждые четыре секунды. Внешний вид установки представлен на рис. 2. Для уменьшения теплопотерь кассеты изолировали от корпуса с помощью материала изолон ($\lambda = 0,034$ Вт/(м·К)), а корпус от окружающей среды — слоем синтепона толщиной 50 мм ($\lambda = 0,04$ Вт/(м·К)).

Реверсивные режимы теплообмена (регенерации теплоты) осуществляли по двум методикам. По первой методике переключения потока воздуха проводили следующим образом: в каждом нечетном полуцикле — при достижении фиксированного падения температуры ΔT_T на теплом конце регенератора, а в каждом четном — по длительности предыдущего нечетного полуцикла. По второй методике переключения осуществляли при достижении фиксированного падения температуры на теплом ΔT_T и холодном ΔT_X концах регенератора ($\Delta T_T = \Delta T_X$).

Первая методика заключалась в том, что на холодный вход установки подавали воздух при температуре $T_X = -8$ °С. Проходя через засыпку шаров, воздух нагревался до $T_T = 20,5$ °С (исходная температура засыпки). По мере охлаждения

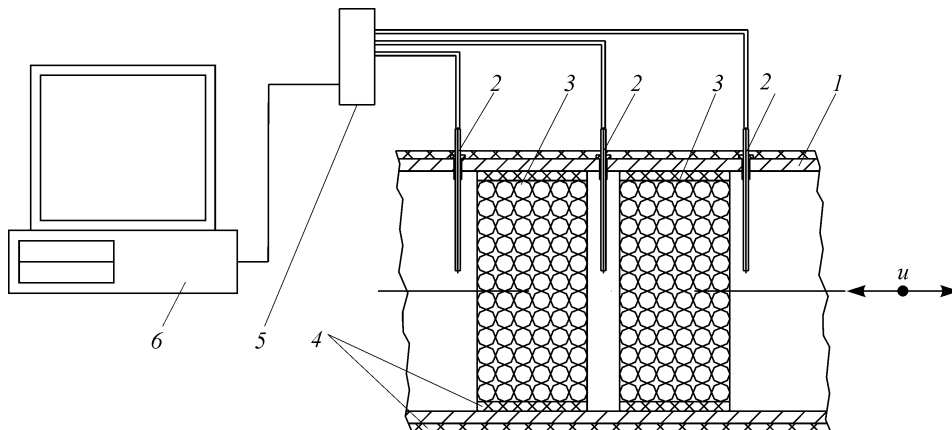


Рис. 1. Схема рабочего участка экспериментальной установки.

1 — труба, 2 — термопары, 3 — кассеты с теплоаккумулирующей средой, 4 — теплоизоляция, 5 — АЦП, 6 — компьютер.



Рис. 2. Внешний вид установки для исследования реверсивных процессов теплообмена (без теплоизоляции).

шаров температура воздуха на теплом конце начинала постепенно понижаться. Когда она уменьшалась на заданную величину $\Delta T_T = 2,5, 5,0, 7,5$ или $10,0$ °С (через время $\Delta \tau_1$), направление потока переключали. На теплый вход подавали воздух при $T_T = 20,5$ °С и продували его в течении такого же времени $\Delta \tau_1$. Затем поток вновь переключали, и на холодный вход регенератора подавали воздух при $T_X = -8$ °С. Через время $\Delta \tau_2 < \Delta \tau_1$, когда температура воздуха на теплом конце регенератора понижалась на $\Delta T_T = 2,5, 5,0, 7,5$ или $10,0$ °С, направление потока снова переключали и т. д. (рис. 3).

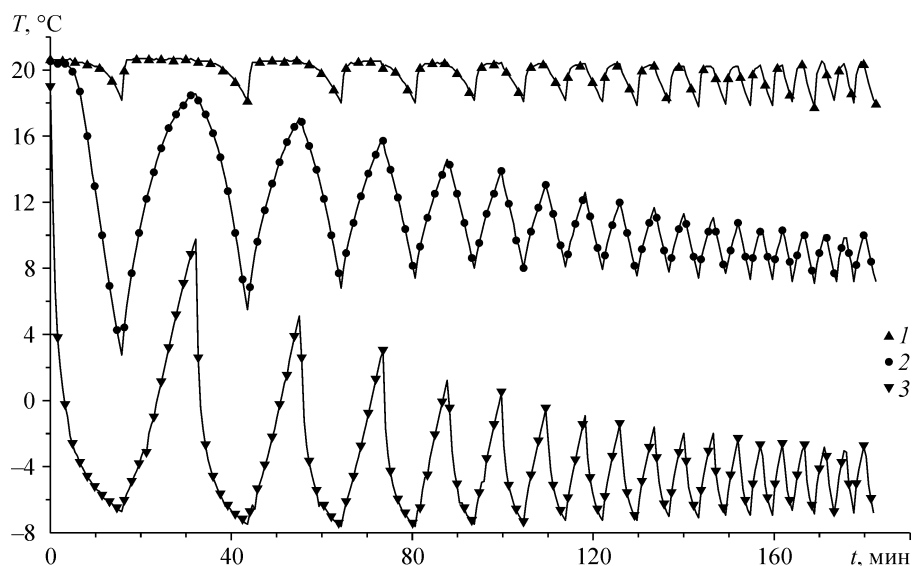


Рис. 3. Установление периодического режима для свинцовых шаров $D = 4,5$ мм по первой методике. $\Delta T = 2,5$ °С. Расход воздуха $10,7$ м³/ч.

1 — температура T_T на теплом конце, 2 — температура между кассетами, 3 — температура T_X на холодном конце.

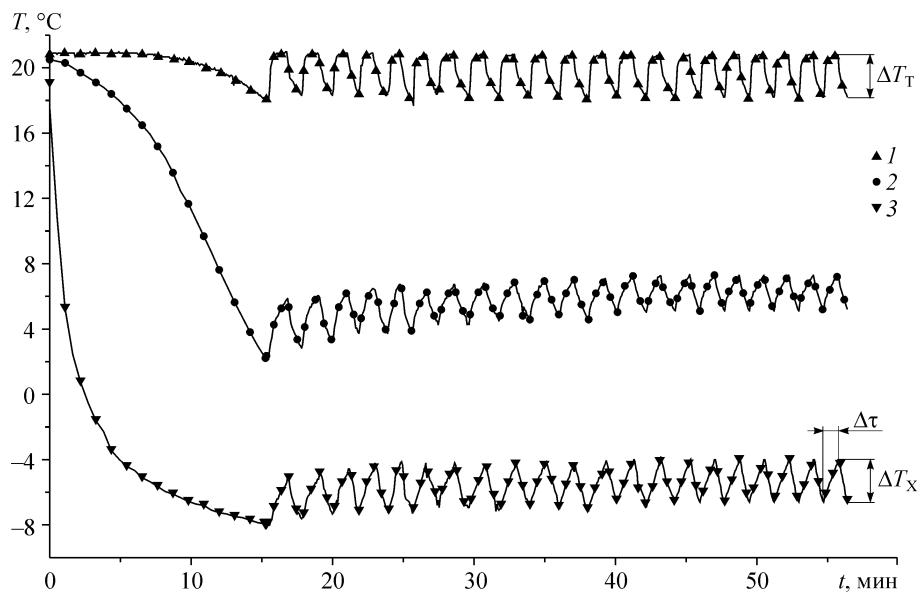


Рис. 4. Установление периодического режима для свинцовых шаров $D = 4,5$ мм по второй методике. $\Delta T = 2,5$ °С. Расход воздуха $10,7$ м³/ч.
 1 — температура T_T на теплом конце, 2 — температура между кассетами, 3 — температура T_X на холодном конце.

Вторая методика отличалась от первой тем, что потоки переключали, когда падение температуры как на теплом, так и холодном конце регенератора достигало заданной величины $\Delta T = 2,5, 5,0, 7,5$ или $10,0$ °С (рис. 4).

В обоих случаях каждый четный полуцикл соответствовал передаче тепла от теплого воздуха засыпке шаров, играющей роль теплоаккумулирующей среды (стадия запасаения). В каждом нечетном полуцикле часть запасенного тепла передавалась холодному воздуху, который нагревался и возвращал теплоту в помещение (стадия возврата).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Процесс установления повторяющегося режима для каждой методики представлен на рис. 3 и 4. Отметим, что при переключении по первой методике перепад температур на холодном конце оказывался гораздо больше, чем на теплом (рис. 3). Это соответствует “проскоку” части теплого воздуха мимо шаров и уменьшению степени регенерации теплоты. Так, для свинцовых шаров при $\Delta T = 2,5$ °С коэффициент теплоутилизации по второй методике оказался $0,91$ вместо $0,88$ — по первой. Если по второй методике увеличить перепад температуры до величины, которая соответствует коэффициенту теплоутилизации $0,88$, то время полуцикла возрастет до 96 секунд, т. е. увеличится на 13 % по сравнению с первой методикой [12]. Таким образом, вторая методика переключения воздушных потоков (рис. 4) приводит к повышению коэффициента теплоутилизации либо к увеличению времени полуцикла.

Обобщенные графики зависимости времени полуцикла от числа Re для исследованных засыпок представлены на рис. 5–8. При близких размерах шаров время полуцикла для стеклянных примерно в $1,5$ – $2,5$ раза больше, чем для свинцовых (рис. 5 и табл. 1). Это в основном связано с большей объемной теплоемкостью

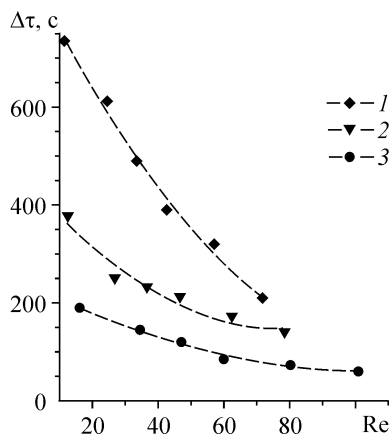


Рис. 5. Зависимость времени переключения по первой методике от числа Re для различных засыпок при $\Delta T_T = 2,5^\circ\text{C}$. Шары — стекло $D 3,2$ (1) мм, шары — свинец $D 3,5$ (2), $4,5$ (3) мм.

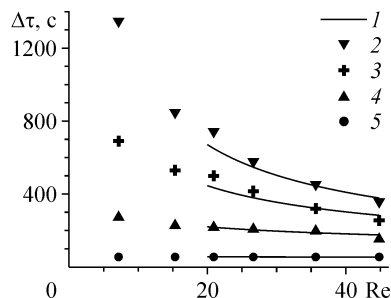


Рис. 6. Зависимость времени переключения по второй методике от числа Re для свинцовых шаров $D = 2,0$ мм. 1 — расчет по уравнениям (1)–(4), $\Delta T = 10$ (2), $7,5$ (3) $5,0$ (4), $2,5$ (5) $^\circ\text{C}$.

стекла ($1960 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$) по сравнению со свинцом ($1450 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$), которые отличаются в 1,35 раза. Некоторое дополнительное уменьшение времени полуцикла для свинцовых шаров может быть связано с тем, что их теплопроводность λ больше, чем у стеклянных. В результате возрастает поток тепла в слой шаров через стенки установки из окружающей среды, и слой прогревается быстрее, чем при его нагреве только фильтрующимся воздухом. Этот эффект особенно заметен при малых потоках, которым соответствуют большие времена контакта воздуха с засыпкой (см. табл. 1).

Таким образом, в качестве теплоаккумулирующей среды перспективно использовать материалы с высокой теплоемкостью и относительно низкой теплопроводностью, которая, тем не менее, должна быть достаточной, чтобы обеспечить быструю передачу тепла от внешней поверхности в объем отдельной частицы среды. Это условие выполняется, если термическое сопротивление внутри единичной частицы засыпки (условно в форме шара радиуса R), которое можно оценить как R/λ , гораздо меньше, чем термическое сопротивление при передаче теплоты от воздуха к внешней поверхности шара $1/\alpha$. При $\alpha \approx 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ достаточно, чтобы теплопроводность материала теплоаккумулирующей среды была гораздо больше $0,01 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, что с запасом выполняется для стекла ($\lambda = 1,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$).

Таблица 1

Зависимость времени переключения $\Delta\tau$ при $\Delta T = 2,5^\circ\text{C}$ (методика 1) для свинцовых и стеклянных шаров от расхода воздуха (экспериментальные данные, длина засыпки 166 мм)

Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Шары — свинец, $d = 3,5$ мм	Шары — стекло, $d = 3,2$ мм	$\Delta\tau (d = 3,2 \text{ мм}) / \Delta\tau (d = 3,5 \text{ мм})$
5,0	375	735	1,96
10,7	248	612	2,47
14,6	230	490	2,13
18,6	210	390	1,86
24,9	170	320	1,88
31,3	138	210	1,52

Таблица 2

Зависимость отношения времен переключения $\Delta\tau$ для свинцовых шаров разного диаметра от расхода воздуха при разных ΔT (методика 2, экспериментальные данные, длина засыпки 166 мм)

Расход, м ³ /ч	$\Delta\tau(d = 2,0 \text{ мм}) / \Delta\tau(d = 4,5 \text{ мм})$		
	$\Delta T = 5,0 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 7,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 10,0 \text{ }^\circ\text{C}$
5,0	1,24	1,09	1,05
10,7	1,12	1,08	1,09
14,6	1,18	1,20	1,20
18,6	1,48	1,36	1,23
24,9	1,58	1,42	1,27
31,3	1,39	1,21	1,31

Характер изменения времени полуцикла в зависимости от Re и ΔT для свинцовых шаров диаметром 2,0 и 4,5 мм практически одинаков: при малых ΔT время полуцикла слабо зависит от Re , в то время как при больших ΔT оно резко уменьшается с увеличением числа Re (табл. 2, рис. 5 и 6). Вместе с тем следует отметить, что время полуцикла для шаров диаметром 2,0 мм несколько больше (от 5 до 58 %) по сравнению с шарами диаметром 4,5 мм. Это можно объяснить более высоким значением коэффициента теплоотдачи при меньшем диаметре шара (приблизительно на 24 %), что, соответственно, делает тепловой фронт более резким.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕВЕРСИВНОГО ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА

Теплообмен между газовым потоком и неподвижным слоем зернистого материала описывается системой уравнений [14]:

$$\rho_H c_H (1 - \varepsilon) \frac{d\theta}{dt} = \alpha S (T - \theta), \quad (1)$$

$$G c'_B \frac{dT}{dl} = \alpha S (\theta - T), \quad (2)$$

с начальными и граничными условиями $t = 0 \Rightarrow \theta(l) = \theta_{ini}(l)$,

$$l = 0 \Rightarrow T = T_{in}.$$

Для описания циклического процесса, реализованного в эксперименте, использовали процедуру реверса потока, которая описывается операцией

$$\theta^+(l) = \theta^-(L - l), \quad (3)$$

где θ^- и θ^+ соответствуют распределению температур до и после переключения потока, L — полная длина слоя.

Для численного решения уравнений (1)–(3) использовали неявный метод Эйлера с постоянным шагом по длине и по времени [15]. Температура на входе в слой зернистого материала T_{in} в общем случае не равна температуре на входе в установку, так как подводящие воздух коммуникации обладают тепловой инерционностью, поэтому T_{in} находили из уравнения

$$dT_{in}/dt = C(T_0 - T_{in}). \quad (4)$$

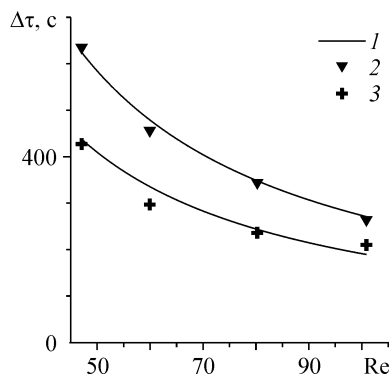


Рис. 7. Зависимость времени полуцикла от числа Re для свинцовых шаров $D = 4,5$ мм.

1 — расчет по уравнениям (1)–(4), $\Delta T = 10$ (2), 7,5 (3) °C.

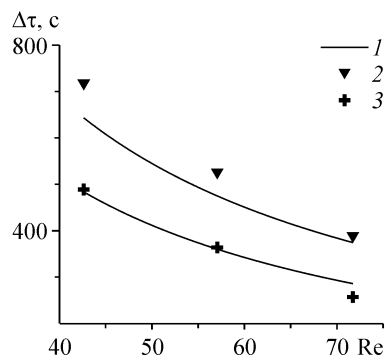


Рис. 8. Зависимость времени полуцикла от числа Re для стеклянных шаров $D = 3,2$ мм.

1 — расчет по уравнениям (1)–(4), $\Delta T = 10$ (2), 7,5 (3) °C.

В уравнении (4) коэффициент C зависит от таких параметров, как скорость фильтрации, теплоемкость воздуха и подводные коммуникации [16, 17]. Значение C рассчитывали для каждого расхода, исходя из экспериментальных данных по изменению во времени температуры воздуха на входе в установку при прямом и обратном направлении течения. Так, например, при расходе $18,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ этот коэффициент для охлаждения составлял $C = 0,009 \text{ с}^{-1}$. Пористость ε принимали как для хаотической упаковки шаров $\varepsilon = 0,4$. Значения c_n и ρ_n брали равными 125 и $740 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, 11340 и $2650 \text{ кг}/\text{м}^3$ для свинца и стекла соответственно [18]. Для вычисления числа Nu в диапазоне $Re > 20$ использовали зависимость Тимофеева [19]:

$$Nu = 0,61 \cdot Re^{0,67}.$$

На рис. 6–8 представлены результаты расчета времени полуцикла в зависимости от числа Re для шаров различного диаметра при различных ΔT и проведено его сравнение с опытными данными. Из рисунков видно, что наблюдается удовлетворительное совпадение времен при больших значениях чисел Re и больших ΔT . При малых значениях Re заметно сказывается влияние подвода теплоты из окружающего пространства, который не учитывается уравнениями (1)–(3). В результате дополнительного теплоподвода экспериментальные значения времени полуцикла оказываются меньше расчетных.

ВЫВОДЫ

Представлены результаты экспериментального исследования циклического теплообмена при фильтрации потока воздуха через неподвижную теплоаккумулирующую среду, в качестве которой использовали свинцовые ($D = 2,0, 3,5$ и $4,5$ мм) и стеклянные шары ($D = 3,2$ мм). Исследованное устройство имитировало циклические режимы регенерации теплоты в системе вентиляции бытовых и офисных помещений. Для исследованных засыпок измерены зависимости времени полуцикла от числа Рейнольдса. Разработана математическая модель, описывающая теплообмен между газовым потоком и неподвижным слоем шаров. Показано, что хорошее согласие экспериментальных данных с расчетными наблюдается при больших числах Рейнольдса. При малых Re сказывается влияние тепловых потерь, в результате чего экспериментальное время полуцикла оказывается меньше расчетного.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

C — коэффициент в уравнении (4), c^{-1} ,	c_n — массовая удельная теплоемкость насадки, Дж/(кг·К),
D — диаметр, мм,	$c'_в$ — объемная удельная теплоемкость воздуха, Дж/(м ³ ·К),
G — линейная скорость, м/с,	l — текущая длина слоя, мм,
L — общая длина слоя, мм,	m — масса насадки, кг,
R — радиус шара, мм,	t — время процесса, мин,
S — удельная поверхность слоя зернистого материала, м ⁻¹ ,	α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К),
T — температура воздуха, °С,	ε — пористость слоя,
T_m — входная температура воздуха в слое, °С,	θ — температура насадки, °С,
T_0 — входная температура воздуха в установке, °С,	θ_{ini} — начальная температура насадки, °С,
T_1 — температура на теплом конце регенератора, °С,	λ — коэффициент теплопроводности Вт/(м·К),
T_x — температура на холодном конце регенератора, °С,	ρ_n — плотность насадки, кг/м ³ ,
ΔT — изменение температуры воздуха, °С,	τ — время контакта, с,
	$\Delta\tau$ — время переключения, с,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Матрос Ю.Ш.** Катализаторы и каталитические процессы. — Новосибирск: Ин-т катализа СО АН СССР. — 1977. — С. 111–134.
2. **Матрос Ю.Ш.** Реакторы с неподвижным слоем катализатора // Кинетика и катализ. — 1981. — Т. 22, № 2. — С. 505–512.
3. **Франк-Каменецкий Д.А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1967. — 426 с.
4. **Ruthven D.M., Farooq S., Knaebel K.S.** Pressure Swing Adsorption. — New York. — 1994. — 352 p.
5. **Боресков Г.К., Матрос Ю.Ш., Киселев О.В., Бунимович Г.А.** Осуществление гетерогенного каталитического процесса в нестационарном режиме // Докл. АН СССР. — 1977. — Т. 237, № 1. — С. 160–163.
6. **Боресков Г.К., Бунимович Г.А., Матрос Ю.Ш., Иванов А.А.** Осуществление каталитических процессов в нестационарных условиях // Кинетика и катализ. — 1982. — Т. 23, № 2. — С. 402–406.
7. **Теплотехника** металлургического производства. — М: МИСИС. — 2002. — Т. 2. — С. 246–253.
8. **Теплотехника** / Под ред. В.Н. Луканина. — М.: Высшая школа, 1999. — 671 с.
9. **Поз М. Я., Сенатова В. И., Грановский В. Л.** Утилизация тепла и холода вытяжного воздуха в системах вентиляции и кондиционирования воздуха (конструкции и методы расчета). — М.: ВНИИИС, 1980. — (Обзорная информация, № 1). — 97 с.
10. **Бялый Б. И., Динцин В.А., Щекин И.Р., Розенштейн И.Л.** Оборудование для утилизации тепловой энергии вентиляционных выбросов // Водоснабжение и санитарная техника. — 1982. — № 5. — С. 10–13.
11. **Богословский В.Н., Поз М.Я.** Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Стройиздат, 1983. — С. 208–225.
12. **Аристов Ю.И., Мезенцев И.В., Мухин В.А.** Новый подход к регенерации теплоты и влаги в системе вентиляции помещений. 1. Лабораторный прототип регенератора // ИФЖ. — 2006. — Т. 79, № 3. — С. 143–150.
13. **Аристов Ю.И., Мезенцев И.В., Мухин В.А.** Новый подход к регенерации теплоты и влаги в системе вентиляции помещений. 2. Прототип реального устройства // ИФЖ. — 2006. — Т. 79, № 3. — С. 151–157.
14. **Schuman T.E.W.** Heat transfer a liquid flowing trough a porous prism // J. Franklin Inst. — 1929. — Vol. 208, No. 3. — P. 405–416.
15. **Хайрер Э., Ваннер Г.** Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. — М.: Мир, 1999. — 390 с.
16. **Иоффе И.И., Письмен Л.М.** Инженерная химия гетерогенного катализа. — М.: Химия, 1965. — 456 с.
17. **Левеншпиль О.** Инженерное оформление химических процессов. — М.: Химия, 1969. — 621 с.
18. **Гува А. Я.** Краткий теплофизический справочник. — Новосибирск, 2002. — 300 с.
19. **Тимофеев В.Н.** Теплообмен в слое // Известия ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского. — 1949. — № 7. — 12 с.

Статья поступила в редакцию 25 июля 2006 г.