

Автор ер,  
с 49

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

---

Аспирант СЛЮСАРЕНКО Н.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛО-  
ОБМЕННЫХ АППАРАТАХ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ДИСПЕРСНЫМ  
ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ТИПА „ГАЗОВЗВЕСЬ“

Перечислено 12.87

Специальность 274 - „Теоретические основы теплотехники“

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1969

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

---

Аспирант СЛЮСАРЕНКО Н.Н.

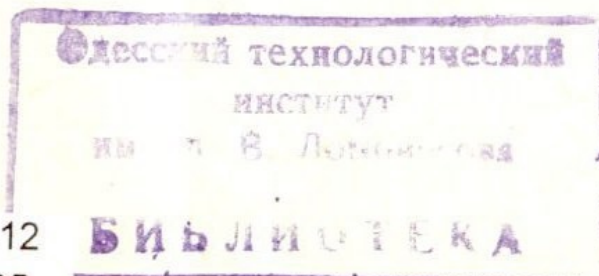
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛО-  
ОБМЕННЫХ АППАРАТАХ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ДИСТАН-  
ЦИОННЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ТИПА „ГАЗОВЗВЕСЬ“

Специальность 274 - „Теоретические основы теплотехники“

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

v0.0. 1698



ОНАХТ 13.06.12  
Исследование переход

Одесса - 1969



v001698

Работа выполнена на кафедре Атомных энергетических установок Одесского технологического института имени М.В.Ломоносова.

Научные руководители: доктор технических наук  
профессор Горбис З.Р.  
кандидат технических наук  
Таубман Е.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
профессор Кринецкий И.И.  
кандидат технических наук  
доцент Андреев Л.П.

Ведущая организация - Институт тепло-массообмена  
АН БССР

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1969 г.

Защита состоится "20" июня 1969 г.  
на заседании Совета Одесского технологического института имени М.В.Ломоносова. Просьба отзывы на автореферат направлять в двух экземплярах по адресу: г.Одесса, ул.Свердлова, 112, Одесский технологический институт имени М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
ОТИЛ.

Ученый секретарь совета

ЗАПОРОЖЕЦ Л.А.

При выполнении главной экономической задачи СССР, поставленной в Программе КПСС, основное внимание уделяется максимальному ускорению научно-технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства. В этих условиях важное значение имеет создание различных аппаратов (в частности, энергетических) с высокими технико-экономическими показателями. Одним из наиболее распространенных элементов энергетических и технологических установок являются теплообменные аппараты.

Проведенные в последние годы исследования показали, что для интенсификации теплообмена с успехом могут применяться теплообменники с промежуточным дисперсным теплоносителем. Особый интерес представляют теплообменники типа „газовзвесь“ (рис.1), отличающиеся высокой интенсивностью тепло- и массообмена, малым гидравлическим сопротивлением и, при соответствующем конструктивном выполнении, компактностью. Наличие движущейся регулируемой поверхности нагрева - важная характеристика таких теплообменников.

В первой главе работы рассмотрены особенности конструкции и работы таких теплообменников и состояние исследования процессов в них. Изучаемый аппарат замкнут по промежуточному теплоносителю, непрерывно циркулирующему в нем. Проходя через каскад последовательно включенных емкостей (вспомогательные узлы и теплообменные камеры), она движется плотным слоем в промежуточных емкостях и в виде противоточной газовзвеси в теплообменных камерах.

В настоящее время степень изученности совместной работы этих элементов недостаточна, а данные о переходных процессах отсутствуют. Необходимость в исследовании установившихся и переходных процессов и совершенствовании методов расчета теплообменников типа „газовзвесь“ возникает, прежде всего, в связи с задачами их автоматизации. Для проектирования систем автоматического регулирования, их наладки и эксплуатации необходимы данные о статистических и динамических характеристиках теплообменника. Изучение переходных процессов важно и для уточнения известных связей между характе-

ристиками таких теплообменников. Решение этих задач требует математического описания теплообменника, а также использования современных средств вычислительной техники.

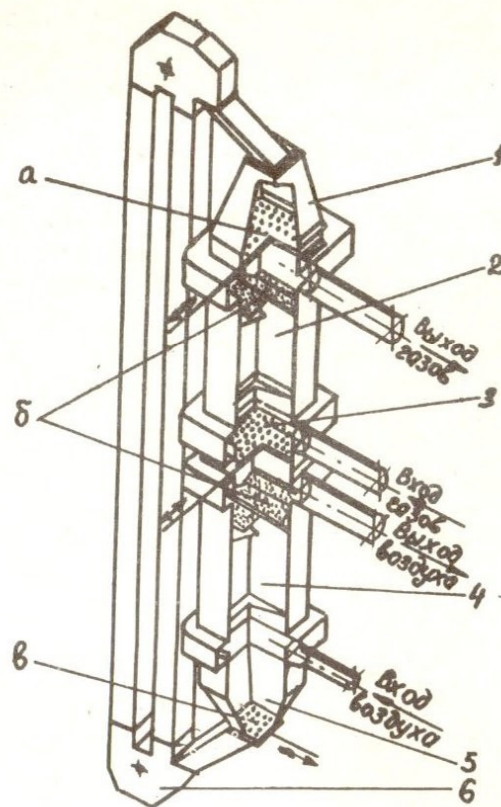


Рис. 1.

1 - верхний бункер; 2 - газовая камера; 3 - затворно-распределительный узел; 4 - воздушная камера; 5 - нижний бункер; 6 - элеватор; а - верхний питатель; б - тормозящие элементы; в - нижний питатель.

Существующие методы расчета переходных процессов разработаны применительно к котельным агрегатам, выпарным установкам, аппаратам химической технологии и др. тепловым и технологическим объектам. Однако достаточно полная система уравнений, описывающая переходные процессы в теплообменниках типа „газовзвесь“ по различным параметрам с учетом их взаимосвязи, до сих пор отсутствует. Анализ методов изучения и расчета переходных процессов различных тепловых объектов показывает их общность. Она проявляется, прежде всего, в одинаковом математическом подходе, основанном на совместном рассмотрении соответствующей системы уравнений.

Указанное определило основные задачи и содержание работы:

1. Получение системы дифференциальных уравнений, описывающей установившиеся и переходные процессы в теплообменнике типа „газовзвесь“.

2. Экспериментальное исследование конкретного теплообменника с целью получения дополнительных уравнений связи между расходом промежуточного теплоносителя, газа, воздуха и конструктивными характеристиками его элементов.

3. Исследование переходных процессов в теплообменнике типа „газовзвесь“ экспериментальными методами и методами математического моделирования с использованием электронной вычислительной машины.

Получение точных решений для таких сложных объектов, как теплообменник с промежуточным дисперсным теплоносителем типа „газовзвесь“, является затруднительным. Поэтому работа ограничивается получением надежных качественных и приближенных количественных результатов, удовлетворительных для инженерных расчетов.

Во второй главе работы рассматривается вывод системы дифференциальных уравнений, описывающей установившиеся и переходные процессы в теплообменнике типа „газовзвесь“. Затем проведен анализ коэффициентов этих уравнений и их зависимость от режимных и конструктивных параметров теплообменника.

Газовая (греющая) камера представляется в виде тепловых емкостей: греющие газы в камере, нагреваемый промежуточный твердый теплоноситель, металл корпуса и изоляция. При этом параметры объекта рассматриваются как сосредоточенные, что достаточно справедливо для изученных условий (аппараты с небольшим изменением температур).

С учетом сказанного, на основе совместного рассмотрения уравнений теплового и материального баланса и других уравнений, получено дифференциальное уравнение для определения температуры газа на выходе греющей камеры:

$$G_r \bar{c}_p \frac{d\bar{t}_r}{d\tau} + G_m \bar{c}_m \frac{d\bar{t}_m}{d\tau} + G_u \bar{c}_u \frac{d\bar{t}_u}{d\tau} = W_r^{вх} t_r^{вх} - W_r^{вых} t_r^{вых} - (\alpha F_H)_{I} (\bar{t}_r - \bar{t}_{HI}) - Q_{о.с.I}, \quad (1)$$

а на основе уравнения теплового баланса для стенки корпуса камеры и изоляции можно записать:

$$G_m \bar{c}_m \frac{d\bar{t}_m}{d\tau} + G_u \bar{c}_u \frac{d\bar{t}_u}{d\tau} = (G_m \bar{c}_m + 0,5 G_u \bar{c}_u) \frac{d\bar{t}_r}{d\tau}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим

$$a_1 \frac{d\bar{t}_r^{вх}}{d\tau} = -a_2 \bar{t}_r^{вх} + a_3 \bar{t}_r^{вх} + 0,5 (t_{HI}^{вх} + t_{HI}^{вых}) - a_4, \quad (3)$$

где:  $a_1 = \frac{G_r \bar{c}_p + G_m \bar{c}_m + 0,5 G_u \bar{c}_u}{2(\alpha F_H)_{I}}; a_2 = \frac{W_r^{вх}}{(\alpha F_H)_{I}} + 0,5;$

$a_3 = \frac{W_r^{вх}}{(\alpha F_H)_{I}} - 0,5; a_4 = \frac{Q_{о.с.I}}{(\alpha F_H)_{I}} \quad (4)$

Уравнение (3) содержит в правой части температуру промежуточного теплоносителя на выходе из камеры. Для ее определения необходимо дополнительное уравнение для  $t_{HI}^{вх}$ . Оно получено на основе совместного рассмот-

рения уравнений теплового и материального баланса для потока промежуточного теплоносителя через камеру:

$$\theta_1 \frac{dt_{HI}^{вх}}{d\tau} = -\theta_2 t_{HI}^{вх} + \theta_3 t_{HI}^{вх} + 0,5 (t_r^{вх} + t_r^{вых}), \quad (5)$$

где

$$\theta_1 = \frac{G_{HI} \bar{c}_{HI}}{2(\alpha F_H)_{II}}; \theta_2 = \frac{W_{HI}^{вх}}{(\alpha F_H)_{II}} + 0,5; \theta_3 = \frac{W_{HI}^{вх}}{(\alpha F_H)_{II}} - 0,5. \quad (6)$$

В свою очередь, масса промежуточного теплоносителя, одновременно находящегося в камере, определяется как

$$G_H = \beta p_T V_K \quad (7)$$

Полученная система дифференциальных уравнений (3) и (5) приближенно описывает установившиеся и переходные процессы в газовой теплообменной камере.

Так как камера охлаждения промежуточного теплоносителя (воздушная) по конструкции и происходящим в ней процессам аналогична газовой, то можно записать рассмотренные выше уравнения и для этой камеры:

уравнение для температуры воздуха на выходе из камеры:

$$C_1 \frac{dt_e^{вх}}{d\tau} = -C_2 t_e^{вх} + C_3 t_e^{вх} + 0,5 (t_{HI}^{вх} + t_{HI}^{вых}) - C_4, \quad (8)$$

где

$$C_1 = \frac{G_B \bar{c}_p + G_m \bar{c}_m + 0,5 G_u \bar{c}_u}{2(\alpha F_H)_{II}}; C_2 = \frac{W_e^{вх}}{(\alpha F_H)_{II}} + 0,5;$$

$$C_3 = \frac{W_e^{вх}}{(\alpha F_H)_{II}} - 0,5; C_4 = \frac{Q_{о.с.II}}{(\alpha F_H)_{II}}; \quad (9)$$

уравнение для температуры потока промежуточного теплоносителя

$$K_1 \frac{dt_{HI}^{вх}}{d\tau} = -K_2 t_{HI}^{вх} + K_3 t_{HI}^{вх} + 0,5 (t_e^{вх} + t_e^{вых}), \quad (10)$$

где 
$$K_1 = \frac{g_{H2} \bar{c}_H}{2(\alpha F_H)_{II}}; \quad K_2 = \frac{W_{H2}^{6yx}}{(\alpha F_H)_{II}} + 0,5; \quad K_3 = \frac{W_{H2}^{6x}}{(\alpha F_H)_{II}} - 0,5. \quad (11)$$

Разделив дифференциальные уравнения (3), (5), (8) и (10) на коэффициенты при их производных и выразив потери тепла в окружающую среду через параметры газов (воздуха), получим взамен уравнений (2), (5), (8) и (10).

$$\frac{dt_r^{6yx}}{dt} = -A_1 t_r^{6yx} + A_2 t_r^{6x} + A_3 (t_{H2}^{6x} + t_{H2}^{6yx}); \quad (12)$$

$$\frac{dt_{H2}^{6yx}}{dt} = -B_1 t_{H2}^{6yx} + B_2 t_{H2}^{6x} + B_3 (t_r^{6x} + t_r^{6yx}); \quad (13)$$

$$\frac{dt_e^{6yx}}{dt} = -C_1 t_e^{6yx} + C_2 t_e^{6x} + C_3 (t_{H2}^{6x} + t_{H2}^{6yx}); \quad (14)$$

$$\frac{dt_{H2}^{6x}}{dt} = -K_1 t_{H2}^{6x} + K_2 t_{H2}^{6x} + K_3 (t_e^{6x} + t_e^{6yx}), \quad (15)$$

где 
$$A_1 = \frac{a_2 + X_1(a_3 + 0,5)}{a_1}; \quad A_2 = \frac{a_3 - X_1(a_3 + 0,5)}{a_1}; \quad A_3 = \frac{0,5}{a_1};$$

$$B_1 = \frac{b_2}{b_1}; \quad B_2 = \frac{b_3}{b_1}; \quad B_3 = \frac{0,5}{b_1};$$

$$C_1 = \frac{c_2 + X_2(c_3 + 0,5)}{c_1}; \quad C_2 = \frac{c_3 - X_2(c_3 + 0,5)}{c_1}; \quad C_3 = \frac{0,5}{c_1};$$

$$K_1 = \frac{k_2}{k_1}; \quad K_2 = \frac{k_3}{k_1}; \quad K_3 = \frac{0,5}{k_1}.$$

Здесь  $X_1, X_2$  — коэффициенты, учитывающие потери тепла в окружающую среду в газовой и воздушной камерах.

Анализ коэффициентов дифференциальных уравнений (12) ÷ (15) показал возможность получения выражений, общих для теплообменных камер. Тогда, взамен (16) коэффициентов А и С, получим

$$\Gamma_1 = 5,55 \cdot 10^{-4} \frac{W}{W_K} \cdot (1 - X + 0,5 \Pi); \quad (17)$$

$$\Gamma_2 = 5,55 \cdot 10^{-4} \frac{W}{W_K} \cdot (1 - X - 0,5 \Pi);$$

$$\Gamma_3 = 2,78 \cdot 10^{-4} \frac{W}{W_K} \cdot \Pi.$$

Взамен коэффициентов В и К (16)

$$D_1 = 5,55 \cdot 10^{-4} \frac{W_H}{W_{KH}} \cdot (1 + 0,5 \Pi_H);$$

$$D_2 = 5,55 \cdot 10^{-4} \frac{W_H}{W_{KH}} \cdot (1 - 0,5 \Pi_H); \quad (18)$$

$$D_3 = 2,78 \cdot 10^{-4} \frac{W_H}{W_{KH}} \cdot \Pi_H,$$

где  $W_K, W_{KH}$  — условный (по массам) водяной эквивалент камеры и твердого теплоносителя в соответствующей теплообменной камере;

$W, W_H$  — водяной эквивалент газа (воздуха) и твердого теплоносителя;

$\Pi, \Pi_H$  — комплекс  $\frac{\alpha F_H}{W}$  и  $\frac{\alpha F_H}{W_H}$ , соответственно.

Рассматриваемые теплообменники, помимо рабочих камер, содержат вспомогательные узлы (рис.1): верхний бункер (1), промежуточный узел (3), нижний бункер (5) и линию транспорта (8), в которых во время работы теплообменника находится постоянно обновляющийся запас твердого теплоносителя. Запишем уравнения, связывающие запас промежуточного теплоносителя в каждом узле с его расходом:

$$\frac{dh_{сн1}}{dt} = \delta_1 (u_{H1}^{6x} - u_{H1}^{6yx}); \quad (19)$$

$$\frac{dh_{сн3}}{dt} = \delta_3 (u_{H3}^{6x} - u_{H3}^{6yx}); \quad (20)$$

$$\frac{dh_{сн5}}{dt} = \delta_5 (u_{H5}^{6x} - u_{H5}^{6yx}), \quad (21)$$

где  $\delta = \frac{1}{\rho_H S} \cdot [\frac{M}{KZ}];$  S — площадь сечения слоя, (м<sup>2</sup>).

Так как элементы 1, 3 и 5 рассматриваются как звенья чистого запаздывания (потерями тепла в окружающую среду пренебрегаем), а промежуточный теплоноситель циркулирует по замкнутому контуру последовательно через все звенья теплообменника, то запишем уравнения связи для его температуры:

$$t_{Н1}^{вх}(\tau) = t_{Н1}^{вх}(\tau - \tau_1); \quad t_{Н2}^{вх}(\tau) = t_{Н2}^{вх}(\tau - \tau_2);$$

$$t_{Н3}^{вх}(\tau) = t_{Н3}^{вх}(\tau - \tau_3); \quad t_{Н4}^{вх}(\tau) = t_{Н4}^{вх}(\tau - \tau_4);$$

$$t_{Н5}^{вх}(\tau) = t_{Н5}^{вх}(\tau - \tau_5); \quad t_{Н6}^{вх}(\tau) = t_{Н6}^{вх}(\tau - \tau_6).$$

При этом, в каждый момент времени

$$t_{Н1}^{вх} = t_{Н6}^{вх}; \quad t_{Н5}^{вх} = t_{Н6}^{вх}; \quad t_{Н5}^{вх} = t_{Н4}^{вх};$$

$$t_{Н4}^{вх} = t_{Н3}^{вх}; \quad t_{Н3}^{вх} = t_{Н2}^{вх}; \quad t_{Н2}^{вх} = t_{Н1}^{вх}.$$

В свою очередь время транспортного запаздывания  $\tau_1, \tau_3$  и  $\tau_5$  определяется как отношение массы теплоносителя в узле (М) на его расход ( $U_H$ );  $\tau_6 = const$ . Так как время транспортного запаздывания  $\tau_2$  и  $\tau_4$  ничтожно в сравнении с  $\tau_1, \tau_3$  и  $\tau_5$ , то им пренебрегаем.

Для замыкания полученной системы уравнений, ее необходимо дополнить соотношениями для объемной концентрации  $\beta$ , коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , поверхности теплообмена  $F_H$  и зависимостью, связывающей расход промежуточного теплоносителя ( $U_H$ ) с режимными параметрами. Для этой цели воспользуемся уравнениями, полученными на основе исследований [5]

$$\beta = 9,44 \cdot 10^{-3} \cdot n^{0,519} \cdot K_V^{1,44} \cdot \mu_p^{1,15} \left(\frac{d_3}{d_T}\right)^{-1,2} \cdot f_x^{-0,953};$$

$$Nu_T = 0,0011 Re_T^{0,82} \beta^{-0,66}; \quad F_H = 7,2 \beta \frac{V_K}{d_T}, \quad (22)$$

где  $Re_T = \frac{\bar{v}_{om} d_T}{\nu}$  - число Рейнольдса для частиц;

$K_V = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_{0u}}$  - коэффициент аэродинамического торможения частиц;

$\mu_p = \frac{U_H}{U}$  - расходная концентрация;

$f_x$  - живое сечение группы сетчатых тормозающих элементов;

$n$  - число групп тормозящих элементов в камере.

Для получения уравнения связи расхода теплоносителя с режимными параметрами были проведены дополнительные экспериментальные исследования с целью раскрытия предложенного З.Р.Горбисом критериального уравнения

$$Fr_u = f\left(\frac{D_3}{d_T}, Re_{cd}\right). \quad (23)$$

Результаты изучения этого вопроса приведены в главе III.

В итоге получим систему уравнений, описывающую установившиеся и переходные процессы в теплообменном аппарате типа „газовзвесь“. Она, при дополнительной формулировке условий однозначности, устанавливает связь между переменными  $t_r^{вх}, t_g^{вх}, t_H$  и  $h_{cd}$  при различных регулирующих и возмущающих воздействиях  $U_r, U_g, U_H, t_r^{вх}, t_g^{вх}$ .

Таким образом, на основе дифференциальных уравнений (12)÷(15), (19), (20), (21) и формул для расчета коэффициентов этих уравнений, можно оценить влияние различных режимных и конструктивных параметров теплообменного аппарата на его статические и динамические свойства, а также выполнить проектирование аппарата с учетом задач его автоматизации. При проектировании и эксплуатации теплообменных аппаратов применяются различные способы интенсификации процессов теплоотдачи. На основе полученных уравнений можно оценить влияние отдельных факторов, интенсифицирующих процесс теплообмена, на динамические свойства теплообменника.

В главе третьей приводятся результаты экспериментального определения статических и динамических характеристик теплообменника. В качестве объекта исследования использовался полупромышленный теплообменник, работающий в режиме шунтового воздухоподогревателя од-

ного из котлов Одесской ТЭЦ. Эксперименты были направлены на получение: 1) расчетных зависимостей для пилотелей-распределителей промежуточного твердого теплоносителя (раскрытие связей между режимными и конструктивными параметрами) - несвободное истечение; 2) переходных характеристик по температуре газа, воздуха и промежуточного теплоносителя на отдельных участках при различных возмущающих воздействиях по расходу газа, воздуха и промежуточного теплоносителя.

Исследования несвободного истечения теплоносителя из отверстий, при наличии спутного перепада давлений на слое (из верхнего узла в газовую теплообменную камеру), подтвердили увеличение расхода с увеличением спутного перепада давлений.

При этом получены в критериальном виде следующие соотношения:

для свободного истечения из многодырчатого дна

$$Fr_{u,sp} = 233 \left( \frac{D_2}{d_T} \right)^{-1.55} \quad (24)$$

для несвободного истечения

$$Fr_u = 7.75 Re_{cn}^{1.15} \left( \frac{D_2}{d_T} \right)^{-0.63} Re_{cn}^{-0.4} \quad (25)$$

Исследования несвободного истечения теплоносителя показали, что расход заметно уменьшается с ростом встречного перепада давлений. При этом получены следующие расчетные рекомендации:

$$Fr_u = 10^4 Re_{cn}^{1.3} \left( \frac{D_2}{d_T} \right)^{-3}; \quad (26)$$

при

$$0.75 < Re_{cn} < 2.1$$

$$Fr_u = 1.35 \cdot 10^3 Re_{cn}^{3.8} \left( \frac{D_2}{d_T} \right)^{-3} \quad (27)$$

при

$$2.1 < Re < 2.8.$$

Для определения числа Рейнольдса использовалась зависимость, основанная на формуле М.Аэрова:

$$Re_{cn} = \left( 713 + 4.37 \frac{\Delta p_{cn} \rho \varepsilon^3}{h_{cn} a_F^3 \mu^2} \right)^{0.5} - 26.7 \quad (28)$$

Полученные формулы, в зависимости от расчетных требований, позволяют решать следующие задачи: 1) при заданной допустимой перетечке воздуха из камеры в камеру, заданных  $\Delta p_{cn}$  и расходе  $U_H$ , определить высоту слоя ( $h_{cn}$ ), а затем требуемое суммарное проходное сечение для истечения и выбрать, исходя из требований к характеристике регулирующего органа, форму отверстий и шаг между ними; 2) при известной высоте запорного слоя ( $h_{cn}$ ), геометрии регулирующего органа (дырчатого шибера) и  $\Delta p_{cn}$  - определить величину перетечек и возникающий при этом расход материала.

Экспериментальные характеристики разгона теплообменника снимались по общепринятой методике при скачкообразном возмущении (разного знака) расходом газа, воздуха и промежуточного теплоносителя. Характерные кривые разгона представлены на рис.2 и рис.3 (сплошные линии). В первом случае они получены при скачкообразном возмущении расходом теплоносителя ( $U_H$ ), а во втором - расходом газа ( $U_H$ ). Как видно из рис.2, при возмущении расходом  $U_H$ , выходные температуры газовой ( $t_{г}^{вых}$ ,  $t_{не}^{вых}$ ) и воздушной ( $t_{в}^{вых}$ ,  $t_{нв}^{вых}$ ) камеры изменяются в разных направлениях. Переходные характеристики при таком возмущении имеют, в общем случае, колебательный затухающий характер, что является следствием замкнутости теплообменника по промежуточному теплоносителю.

При возмущении расходом газа (рис.3) и воздуха все выходные температуры изменяются в одном направлении, а переходные характеристики имеют экспоненциальный характер. При этом знак изменения температур совпадает со знаком возмущения расходом газа и противоположен знаку возмущения расходом воздуха.

На основе экспериментального определения некоторых переходных характеристик полупромышленного теплообменника установлено:

а) по температуре, давлению и расходу теплоносителя объект обладает значительным самовыравниванием. По уровням теплоносителя на узлах теплообменник может быть представлен в виде интегрирующего звена без запаздывания;

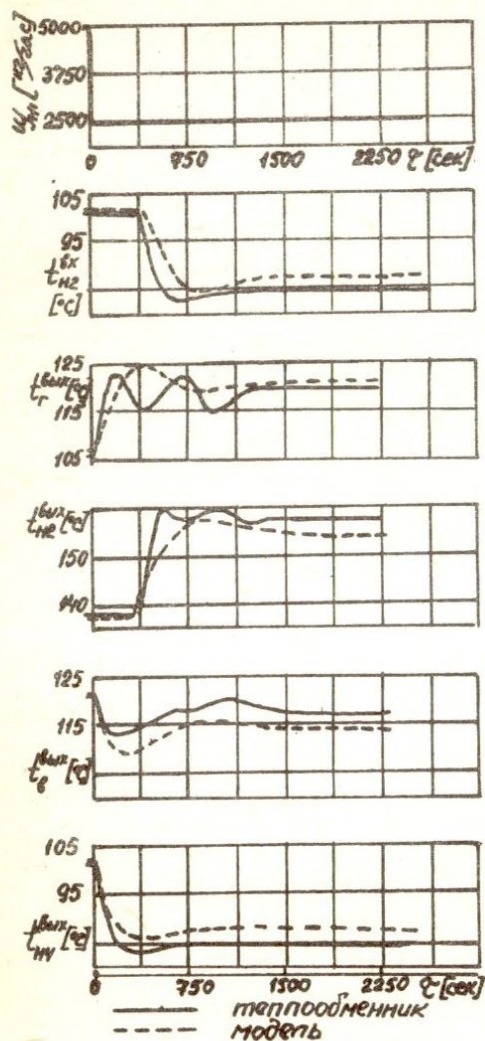


Рис.2. Кривые разгона при возмущении расходом твердого теплоносителя.

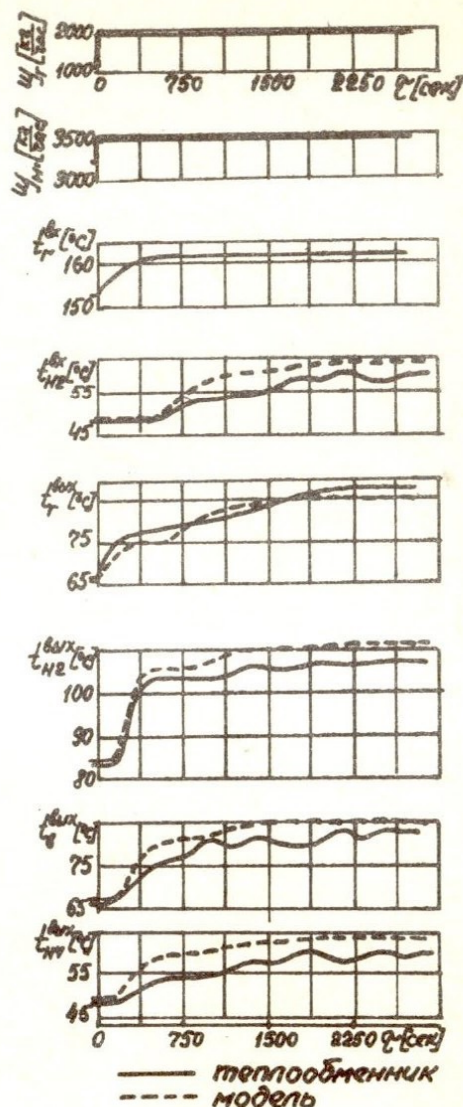


Рис.3. Кривые разгона при возмущении расходом газа.

б) переходный тепловой процесс в объекте, в зависимости от величины и характера внешнего возмущения, заканчивается через 1-3 цикла теплоносителя в аппарате, длительность которого определяется временем одного прохода теплоносителя по контуру движения. Последнее, в зависимости от режимных условий и количества теплоносителя в теплообменнике, может изменяться в пределах  $600 \div 3600$  сек;

в) получение динамических характеристик таких теплообменников экспериментальными методами в полном объеме затруднительно. Поэтому при их исследовании необходимо совместное использование экспериментальных методов и теоретических расчетов.

Для исследования и расчета переходных процессов в таких теплообменниках необходимо выполнить интегрирование системы 7 дифференциальных уравнений, а затем выполнить трудоемкие расчеты большого количества вариантов. Ввиду этого целесообразно, для исследования и расчета переходных режимов в теплообменнике типа „газовзвесь“, использовать современные средства вычислительной техники и математического моделирования.

В главе четвертой рассматривается методика и результаты исследования переходных процессов в таких теплообменниках с помощью электронной вычислительной машины непрерывного действия.

С помощью электронной вычислительной машины непрерывного действия ЭМУ-10 проведены исследования: линейной модели (рис.4), модели промежуточного узла (с регулятором и без регулятора). Получены переходные характеристики по температурам газа, воздуха и теплоносителя на всех узлах теплообменника, по уровню промежуточного теплоносителя на промежуточном узле и по его расходу. Исследования проводились при скачкообразном возмущении расходом промежуточного теплоносителя, расходом газа, воздуха и температуры газа и воздуха на входе в теплообменный аппарат.

На рис.2 и рис.3 представлены характерные переходные характеристики по выходным температурам теплообменника.

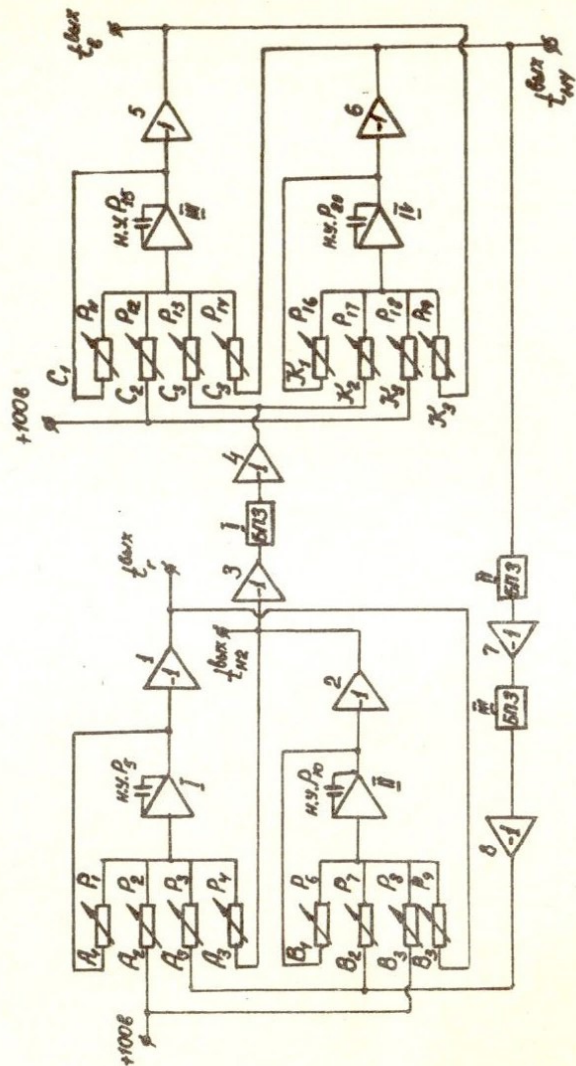


Рис. 4. Структурная схема линейной модели теплообменника

Они получены при скачкообразном изменении расхода промежуточного теплоносителя и расхода газа (пунктирные кривые). Сравнение динамических характеристик, полученных при математическом моделировании и при полупромышленных экспериментах, показывает их удовлетворительное совпадение. На кривых, полученных при эксперименте, наблюдаются колебания температуры, что является следствием работы регулятора в схеме стабилизации уровня теплоносителя на промежуточном затворно-распределительном узле. На кривых, полученных при математическом моделировании, это не наблюдается. Сказанное можно объяснить тем, что исследовалась линейная математическая модель. Режимные параметры (расход газа, воздуха, промежуточного дисперсного теплоносителя и его уровень на отдельных узлах) в такой модели скрыты в коэффициентах дифференциальных уравнений (3,5,8 и 10) и исследовать ее совместно с регулятором не представляется возможным. Коэффициенты уравнений рассчитываются отдельно по приведенным выше формулам (16) и их значение устанавливается с помощью соответствующих потенциометров (рис.4) (вначале для исходного стационарного режима, с целью получения начальных условий по выходным температурам, а затем - с учетом новых режимных факторов после возмущения).

Как видно из уравнений для коэффициентов (глава 11), они нелинейно зависят от режимных параметров — расхода теплоносителя и газов (воздуха). С целью получения связи: расход теплоносителя — уровень теплоносителя на промежуточном узле — коэффициенты дифференциальных уравнений, была исследована нелинейная модель с помощью которой реализуются коэффициенты уравнений. Эта модель включает в себя также модель промежуточного узла с регулятором. Анализ полученных переходных кривых по уровню, расходу и кривых изменения коэффициентов во время переходного процесса показывает, что характер изменения последних зависит от закона регулирования расхода промежуточного теплоносителя. Установлено, что при возмущении расходом промежуточного теплоносителя и расходом газа (воздуха), коэффициенты диф-

Одесский технологический институт  
им. М. В. Ломоносова

№ 0.0.1698

дифференциальных уравнений изменяются по-разному: в первом случае коэффициенты  $A_1, A_3, B_2$  и  $A_2, B_1, B_3$  изменяются, соответственно, в разных направлениях; во втором случае  $A_1, A_2, A_3$  изменяются в одном направлении, а коэффициенты  $B_1, B_2$  и  $B_3$  — в другом.

Сопоставление результатов экспериментального исследования и математического моделирования теплообменника подтверждает правильность проведенных теоретических и расчетных исследований, а также правомочность принятых при математическом моделировании допущений.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Получена система дифференциальных уравнений, описывающая установившиеся и переходные процессы в теплообменниках типа „газовзвесь“, и расчетные зависимости для коэффициентов этих уравнений. На основе этой системы можно выполнить расчеты и моделирование переходных процессов, а также получить систему алгебраических уравнений для проектного и поверочного расчета теплообменника.

2. Получены расчетные зависимости, позволяющие рассчитать характеристики питателей-распределителей насадки, работающих при спутном или встречном перепаде давления на них.

3. Разработана методика и осуществлено математическое моделирование переходных режимов теплообменника типа „газовзвесь“ с помощью электронной вычислительной машины непрерывного действия. Показана эффективность данного метода исследования установившихся и переходных процессов в аппаратах подобного типа.

4. Выполнено экспериментальное определение переходных характеристик полупромышленного теплообменника с промежуточным дисперсным теплоносителем типа „газовзвесь“. Сопоставление результатов математического моделирования и экспериментального определения его переходных характеристик показало их удовлетворительное совпадение.

5. На основе математического моделирования и экспериментального исследования переходных процессов в

теплообменнике типа „газовзвесь“ установлено, что он обладает значительным самовыравниванием по температурам и расходам. По уровням насадки на узлах его можно рассматривать (по отношению к промежуточному узлу и нижнему бункеру) как объект без самовыравнивания.

6. Длительность переходного процесса по всем температурам, примерно, одинакова и в зависимости от режима работы теплообменника, запаса насадки в нем и величины возмущения, может изменяться от нескольких минут до нескольких десятков минут. Длительность переходных процессов по расходу насадки и ее уровню на узлах на порядок меньше длительности переходного теплового процесса в теплообменнике.

7. Теплообменные аппараты типа „газовзвесь“ нуждаются в автоматизации. На первом этапе может быть использована система несвязанного регулирования, заключающаяся в автоматической стабилизации запаса насадки на промежуточном и в нижнем узле. На следующем этапе должна решаться задача стабилизации температуры нагрева.

Предлагаемые способы регулирования осуществлены и проверены на полупромышленном теплообменнике (Одесская ТЭЦ).

8. Полученное математическое описание теплообменников типа „газовзвесь“ можно использовать для синтеза проектируемых систем регулирования и для расчета оптимальных геометрических характеристик отдельных узлов теплообменника. Оно может быть также использовано при оптимизации режимов работы таких теплообменников.

Результаты проведенных в работе исследований использованы при создании опытно-промышленного воздухоподогревателя на Одесской ТЭЦ (применительно к котлу паропроизводительностью 50 т пара/час) и разработке подобного воздухоподогревателя, для Добротворской ГРЭС.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$t_g, t_v, t_n, t_m, t_u$  — температура газа, воздуха, твердого теплоносителя, металла, изоляции;

$C_p, C_n, C_m, C_u$  — теплоемкость газа, (воздуха), твердого теплоносителя, металла и изоляции;

$\rho, \rho_n$  — плотность газа (воздуха), насыпная плотность теплоносителя;

$G_r, G_s, G_n, G_m, G_u$  - масса газа, воздуха и твердого теплоносителя, масса металла камеры и изоляции;

$d_T$  - средний размер частиц теплоносителя;

$\alpha$  - коэффициент теплообмена;

$F_n$  - поверхность твердого теплоносителя в камере;

$V_k$  - объем теплообменной камеры;

$\psi, \psi_n$  - расход газа (воздуха) и твердого теплоносителя;

$\beta$  - объемная концентрация твердого теплоносителя;

$Fr_u$  - критерий Фруда (безразмерный расход);

$d_1, d_2$  - эквивалентный диаметр отверстия;

$p$  - давление;

$\varepsilon$  - порозность слоя;

$a_r$  - поверхность частиц, отнесенная к единице объема слоя;

$\mu$  - коэффициент вязкости;

$\tau$  - время.

## И Н Д Е К С Ы

1, 11 - относят величины к камере нагрева и охлаждения твердого теплоносителя; 1, 2, 3, 4, 5, и 6 - к соответствующему звену теплообменника; „вх“, „вых“ - входная и выходная величина; „—“ над величиной - среднее значение.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Горбис З.Р., Элькин Г.И., Слюсаренко Н.Н., Емельяненко Е.З. О несвободном истечении сыпучей среды, Теплоэнергетика, № 7, 1968.

2. Горбис З.Р., Элькин Г.И., Емельяненко Е.З., Слюсаренко Н.И., Заграй В.А., Питатель для сыпучих материалов. Авт. свидетельство № 235630 (официальный бюллетень, № 5, 1969).

3. Элькин Г.И., Емельяненко Е.З., Слюсаренко Н.Н. Исследование теплообмена в противоточной газозвеси с тормозящими элементами, Изв. ВУЗов, Энергетика, 1966.

4. Элькин Г.И., Горбис З.Р., Слюсаренко Н.Н., Емельяненко Е.З. Воздухонагреватель типа „газовзвесь“ для паровых котлов, Энергетика и электрофикация, № 1, 1968.

5. Горбис З.Р., Элькин Г.И., Слюсаренко Н.Н., Емельяненко Е.З. Теплообмен в торможеной газозвеси с каскадно-расположенными сетками, Материалы Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в сквозных дисперсных потоках, Одесса, 1967.

6. Слюсаренко Н.Н., Горбис З.Р., Элькин Г.И., Емельяненко Е.З. Исследование переходных процессов в теплообменнике „газовзвесь“, Материалы Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в сквозных дисперсных потоках, Одесса, 1967.

7. Слюсаренко Н.Н., Горбис З.Р., Таубман Е.И. Исследование динамических характеристик воздухоподогревателя типа „газовзвесь“, Изв. ВУЗов, Энергетика, 1969, (принята к печати).

## Содержание работы доложено:

1. На Всесоюзной межвузовской научной конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках, Одесса, 1967.

2. На XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX и XXX научных конференциях ОТИ имени М.В.Ломоносова; 1964-1969.

3. 3 доклада приняты на III Международном конгрессе CHISA, Чехословакия, Прага, 1969.