



*On the basis of numerical simulation of heat-and-mass transfer dependencies of mass-transfer characteristics of  $\alpha_\tau$  and  $\alpha_0$  sorption system at varying machine parameters are received.*

А. П. НЕСЕНЧУК, В. М. КОПКО, Т. В. РЫЖОВА,  
М. Г. ПШОНИК, Н. Г. МАЛЬКЕВИЧ, БГА

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ ИСКУССТВЕННЫХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ ОТ $\text{CO}_2$

УДК 628.26 (075.8)

Для изучения работы аппаратов системы очистки [1] был выполнен численный эксперимент. Во всех вариантах такого анализа постоянными оставались температура сорбента на входе в аппарат ( $T_0 = 293 \text{ K}$ ) и порозность на выходе из аппарата. Моделирование выполнено в соответствии с моделью, приведенной авторами в [1]. Кроме модели процессов тепло- и массопереноса, используем дополнительные данные.

Тепловое возмущение системы задаем граничным условием второго рода

$$\frac{1}{g_{22}} \rho_\tau (c_\tau + ac_\tau) (1 - \varepsilon) D_\tau \frac{\partial T}{\partial V|_{V=0}} = Q,$$

которое распространяется от источника энергии по всему объему движущегося сорбента. Характер распространения теплового возмущения можно представить следующим образом:

$$\frac{(c_\tau + ac_\tau) G_u}{g_{11}} \frac{\partial T}{\partial U} = \frac{1}{g_{11} g_{22}} \frac{\partial}{\partial V} \left[ \frac{g_{11} g_{22}}{g_{22} g_{22}} \rho_\tau (1 - \varepsilon) (c_\tau + ac_\tau) D_\tau \frac{\partial T}{\partial V} \right] - \text{HI} [a - a(T)] \rho_\tau (1 - \varepsilon). \quad (1)$$

Заданное тепловое возмущение (1) нарушает адсорбционное равновесие согласно формуле

$$a(T) = W_0 \rho_c \exp \left[ - \left( \frac{RT \ln p_s / p}{E} \right)^2 \right].$$

Двумерный же профиль возмущения системы в свою очередь задается дифференциальным уравнением

$$\frac{G_u}{g_{11}} \frac{\partial a}{\partial U} = \frac{1}{g_{11} g_{22}} \frac{\partial}{\partial V} \left[ \frac{g_{11} g_{22}}{g_{11} g_{22}} \rho_\tau (1 - \varepsilon) D a \frac{\partial a}{\partial V} \right] - \text{I} [a - a(T)] \rho_\tau (1 - \varepsilon).$$

Наибольший интерес при выполнении анализа характеристик аппарата представляют влияние варьируемых параметров системы на положение фронта (зоны) видимого псевдооживления и фронта плотного слоя сорбента; массообменные характеристики сорбента в процессе работы аппарата.

На рис. 1,  $a$  показаны линии порозности  $\varepsilon = 0,5$  и  $0,4$  при расходах материала в аппарате  $G = 0,5$  и  $4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  (пунктиром обозначена зона плотного слоя,  $\varepsilon \leq 0,4$ ). Как видно из рисунка, при достаточно больших расходах материала  $G \geq 4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  псевдооживление наблюдается по всему объему десорбера ( $\varepsilon = 0,5$ ). Плотный слой располагается вблизи источника подвода энергии (ограничивается пунктирными линиями,  $\varepsilon = 0,4$ ) и вблизи оси симметрии (между сплошными линиями,  $\varepsilon = 0,5$ ). В этой области нет прогресса слоя, так как приток тепла блокируется зоной активного термпсевдооживления. На уровне шестого нагревателя плотный слой наблюдается во всем сечении аппарата. При расходах  $0,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  и ниже зона кипения заканчивается на уровне второго нагревателя. Плотный десорбированный слой появляется в области четвертого и последующих рядов трубок поверхности нагрева аппарата. Десорбированный слой омывает второй и третий ряды трубок. Толщина этого слоя возрастает к низу аппарата и, как уже отмечалось, в нижней его половине движется поток с высокой степенью регенерации.

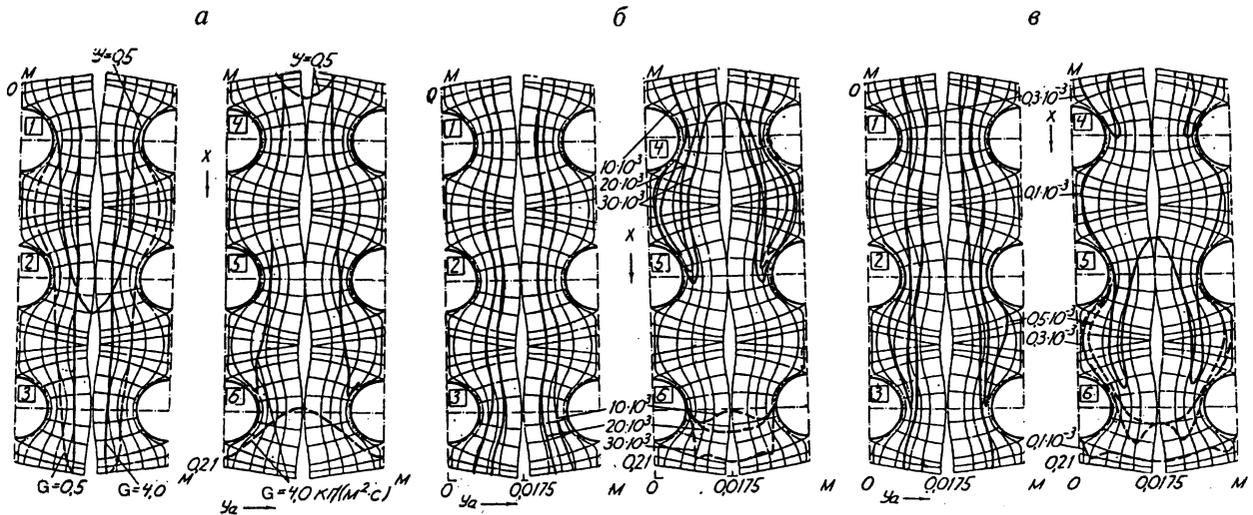


Рис.1. Положение зоны видимого псевдооживления: а—в — соответственно в зависимости от расхода сорбента, тепловой нагрузки десорбера и диаметра частиц сорбента

Положение фронта видимого термпсевдооживления и плотного потока материала при изменении тепловой нагрузки представлено рис.1, б. Как было уже отмечено, с увеличением  $Q$  зона видимого псевдооживления расширяется и при  $Q = 30$  кВт/м<sup>2</sup> кипение охватывает верхнюю половину десорбера во всем его сечении (см. сплошную линию  $Q = 30$  кВт/м<sup>2</sup>). На рисунке отчетливо прослеживаются "языки" изолиний порозности  $\epsilon = 0,5$ , обусловленные блокированием свежих частиц, стекающих из застойных зон полностью десорбированными частицами. На расположение фронта десорбированного материала изменение  $Q$  заметного влияния не оказывает (см. пунктирные линии).

На рис.1, в показано влияние диаметра частиц материала на положение изолиний  $\epsilon = 0,5$  и  $0,4$ . Видно сильное влияние  $d$  на положение изолинии  $\epsilon = 0,5$ . Отчетливо просматривается блокирующее действие десорбированного материала, стекающего из застойных зон. Наблюдается различие в расположении изолиний  $\epsilon = 0,4$  (отмечено пунктиром) при изменении  $d$ .

Массообменные характеристики системы с термпсевдооживленным слоем сорбента и поверхностью нагрева, представленной горизонтальным трубным пучком, показаны на рис. 2—4. Характеристики  $\alpha_t$  и  $\alpha_0$  получены на базе результатов численного анализа.

На рис. 2 приведены зависимости  $\alpha_t$  и  $\alpha_0$  для различного горизонтального шага трубного пучка. Как наиболее важное, необходимо отметить, что  $\alpha_t$  и  $\alpha_0$  слабо зависят от  $Y_a$ , так как процесс термпсевдооживления не распространяется далеко от поверхности трубок. Линии  $\alpha_t$  и  $\alpha_0$  расположены достаточно близко друг от друга (рис. 3), что также свидетельствует о слабой зависимости коэффициентов массоотдачи от диаметра частиц и теплового потока. Исключение составляет изолиния  $\alpha_t$  при  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м, описывающая массоотдачу в плотном гравитационном потоке сорбента.

Определенный интерес представляет рис.4, б, на котором показан характер изменения  $\alpha_t$  и  $\alpha_0$  при изменяемом расходе цеолита  $G$ . Как видно из рисунка, при  $G > 2,2$  кг/(м<sup>2</sup>·с) эффективность работы

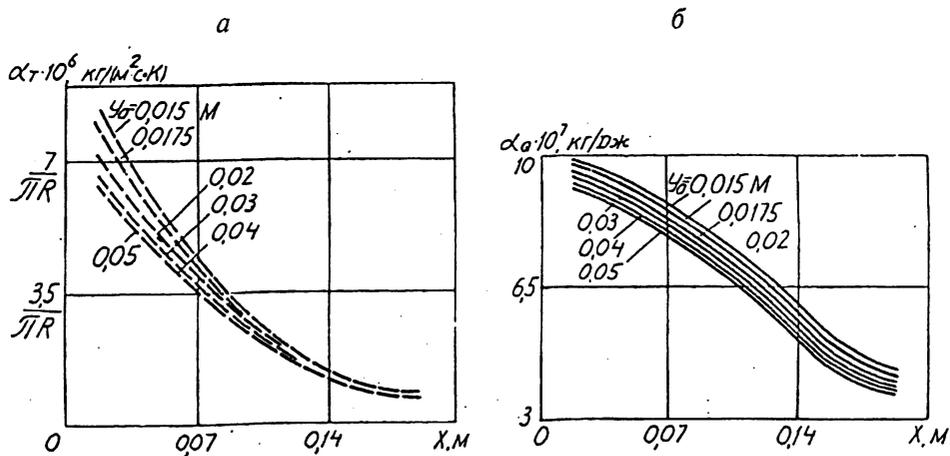


Рис. 2. Значения массообменных характеристик аппарата десорбции системы очистки искусственного газа от  $\text{CO}_2$ : а и б — соответственно для  $\alpha_t$  и  $\alpha_0$

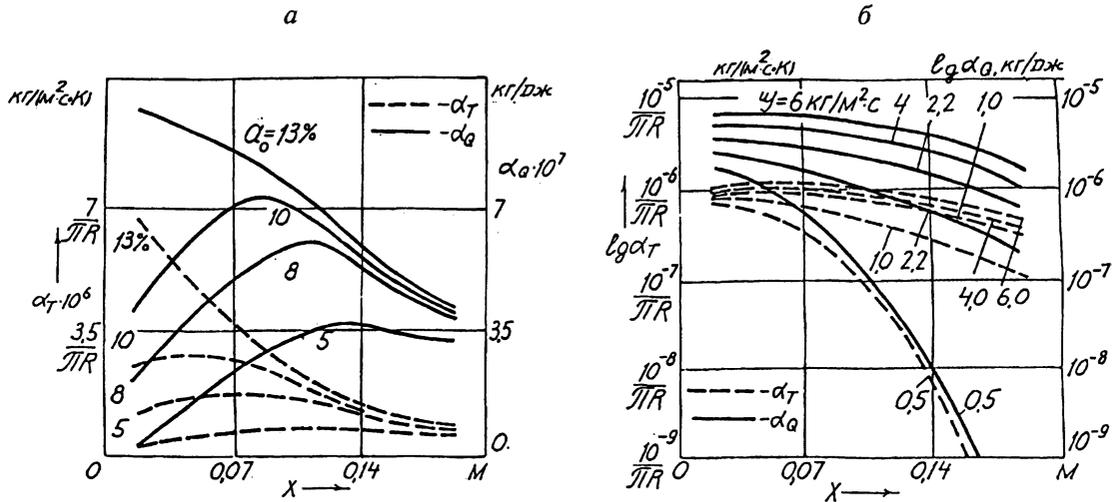


Рис. 3. То же, что и на рис. 2: а и б — соответственно для изменяющихся размера частиц сорбента и тепловой нагрузки трубного пучка

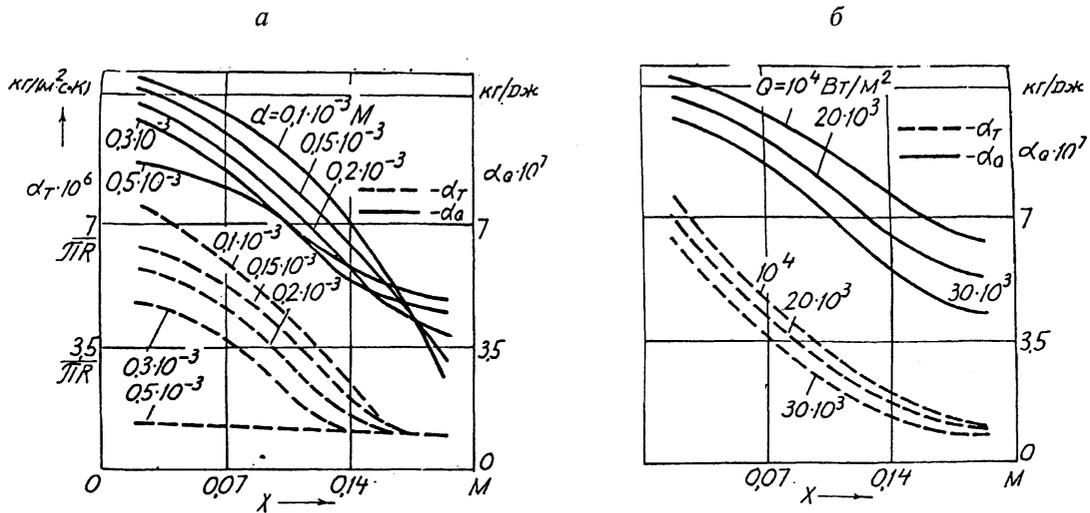


Рис. 4. То же, что и на рис. 2: а и б — соответственно для изменяющихся адсорбции сорбента, поступающего в аппарат, и расхода сорбента в трубном пучке

пучка достигает некоторого предельного значения и дальше уже не возрастает, что существенно отличает массообмен от процесса теплообмена (коэффициент теплоотдачи значительно зависит от Re).

На рис.4, а зависимости  $\alpha_T$  и  $\alpha_Q$  при варьировании начальной адсорбции  $a_0$  имеют явно выраженный экстремум, согласно которому наиболее эффективная работа нагревателей наблюдается где-то в среднем сечении аппарата. При этом экстремум коэффициента массоотдачи смещается вправо и к низу аппарата при снижении начальной адсорбции. Такой характер зависимостей коэффициента массообмена легко объяснить, если принять во внимание, что для начала процесса десорбции  $CO_2$  поток сорбента нужно прогреть до температуры, превышающей равновесную (для заданной начальной адсорбции). Такой нагрев естественно достигается не сразу при входе цеолита в десорбер, а лишь в середине аппарата.

Рассмотренные зависимости использованы при разработке инженерной методики расчета аппаратов термической регенерации синтетических цеолитов группы А, а также при сопоставлении эффективности их работы.

### Литература

1. Несенчук А. П., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. и др. Энергоэкологические аспекты целесообразности очистки доменного газа перед его сжиганием в нагревательных печах металлургических переделов // Литье и металлургия. 1999. № 1. С.41—44.