

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОДУВКИ НА ТЕПЛООБМЕН ЗЕРНИСТОГО СЛОЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ НАГРЕВА

А. Д. АЛЕКСЕЕВ, В. И. ОСИН

(Представлена научным семинаром кафедры процессов, машин
и аппаратов химических производств)

Целью исследования являлось определение влияния режима и характера движения ожижающей среды на коэффициент теплоотдачи α от нагретой поверхности к слою. Исследования проводились в два этапа. Вначале были сняты гидродинамические характеристики слоя при стационарном и синусоидально-пульсирующем характерах движения ожижающего агента и определены закономерности изменения сопротивления и объема слоя от скорости фильтрации и частоты пульсаций.

В качестве дисперсного материала использовался речной песок плотностью $\rho = 2659 \text{ кг/м}^3$ (фракция $0,5 \div 1 \text{ мм}$). Насыпная плотность слоя составляла $\rho_{\text{сл.}} = 1430 \text{ кг/м}^3$. Материал загружался в прозрачную цилиндрическую камеру диаметром 200 и высотой 470 мм. Синусоидально-пульсирующий характер движения воздуха через систему обеспечивался роторным преобразователем, привод которого позволял менять частоту пульсаций от 0 до 25 гц.

Гидродинамические характеристики слоя определялись при частоте пульсаций воздушного потока $f = 3,35; 6,7; 10; 16,7 \text{ гц}$ и осредненных во времени скоростях фильтрации от 0 до 68 м/сек. Были получены соответствующие характеристики при продувании слоя невозмущенным (стационарным) потоком.

На рис. 1а приведены данные об изменении объема, полученные при начальной высоте слоя $H_0 = 82 \text{ мм}$ и общем весе загруженного материала $G = 3780 \text{ г}$.

Визуальными наблюдениями установлено качественное отличие в поведении слоя в случае его продувания синусоидально-пульсирующим потоком. Это отличие состоит в том, что стадии расширения (псевдооживления) слоя предшествует его уплотнение, величина которого зависит от частоты пульсаций и скорости фильтрации. Из рисунка видно и качественное отличие, проявляющееся в том, что расширение слоя происходит при скоростях намного меньших, чем в случае движения через него невозмущенного потока.

Исследования теплообмена проводились при осредненных скоростях фильтрации близких к 0,063; 0,073; 0,1; 0,175; 0,225; 0,38; 0,51 и 0,58 м/сек. Значения скоростей выбраны на основе результатов исследования гидродинамики слоя с учетом того, что при всех частотах наблюдались сходные состояния, а именно:

- а) скорости фильтрации меньшие 0,075 м/сек соответствуют нисходящим кривым уплотнения слоя;
- б) скорости близкие к 0,1 м/сек соответствуют максимально уплотненным состояниям;

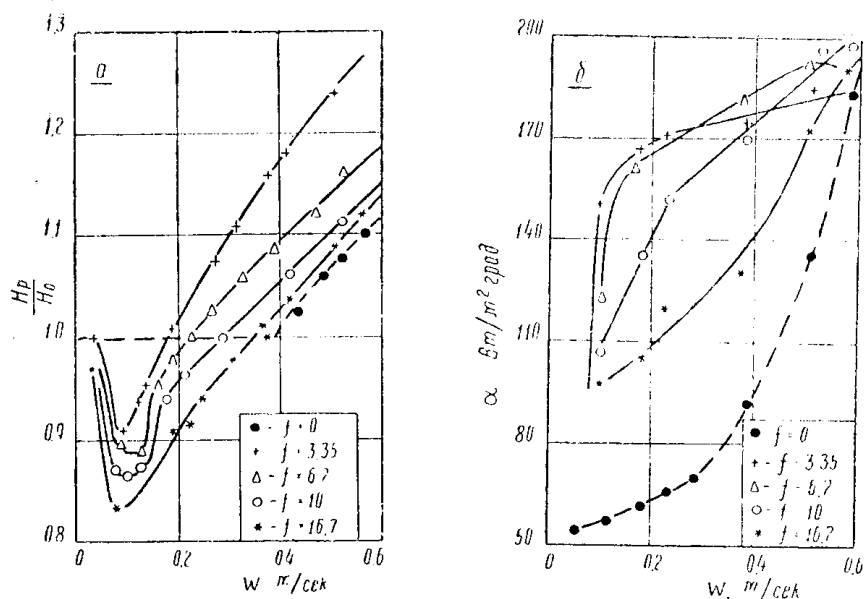


Рис. 1. Влияние скорости фильтрации и условий продувки на изменение объема слоя (а) и коэффициента теплоотдачи (б)
 H_p — высота слоя в рабочих условиях. $f=0$ — поток стационарный; $f=3,35...16,7$ — частота пульсаций, гц

в) в диапазоне скоростей от 0,1 до 0,175 м/сек слой расширен, но его порозность меньше порозности свободно насыпанного песка;

г) скорости, большие 0,175 м/сек, соответствуют различным промежуточным состояниям слоя.

Нагревательный элемент располагался по оси аппарата на расстоянии 28 мм от распределительной решетки. Термодары размещались в линию на различном расстоянии от нагревателя. Незащищенные спаи располагались на высоте 41 мм от решетки. В процессе эксперимента замерялись сила тока I и температура в трех участках слоя.

Средние значения коэффициента теплоотдачи α_T определялись расчетом по формуле [1]

$$\alpha_T = \frac{4926 \cdot I^2}{85 - t_{cl}} \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град.}$$

На рис. 1б показан характер изменения α_T в зависимости от скорости фильтрации.

Из приведенных данных видно, что при продувании неподвижного слоя стационарным потоком (режим фильтрации) наблюдается медленное возрастание α_T , что вызвано, в основном, увеличением скорости газа, омывающего поверхность нагрева. С переходом слоя в псевдооживленное состояние повышается интенсивность пульсационного перемешивания частиц и как результат этого более быстрое возрастание α_T . Максимальное значение коэффициента теплоотдачи имело место при скорости фильтрации, близкой к 0,68 м/сек, и «числе псевдооживления» 1,8.

Согласно [2, 3] максимальное значение коэффициента теплоотдачи для слоя песка составляет около 238 ккал/м²час·град. (205 вт/м²град) и наблюдается при «числе псевдооживления» 1,7÷1,9. В наших экспериментах $\alpha_{Tmax} = 198,5 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}$, что практически совпадает с данными других исследователей.

Из рис. 1б видно, что в случае продувки песка нестационарным потоком зависимость $\alpha_T = \varphi(w)$ носит иной характер. Коэффициент теплоотдачи резко возрастает уже при скоростях фильтрации, меньших 0,1 м/сек, что, вероятно, обусловлено более плотным размещением частиц в слое. В уплотненном состоянии следует ожидать большего влия-

ния на теплообмен теплопроводности материала, так как расстояние между частицами сокращается, поверхность их соприкосновения увеличивается, а относительная подвижность частиц невелика. С увеличением скорости темп роста α_T замедляется, а после достижения максимального значения наблюдается его снижение. Максимальное значение α_T при пульсирующем потоке имеет место при меньших скоростях фильтрации. Так при частотах 3,35; 6,7; 10 гц $\alpha_{T, \max}$ наблюдается при скоростях фильтрации около 0,5 м/сек, что на 32% меньше соответствующих значений скорости стационарного режима псевдооживления. При скорости нестационарной фильтрации, близкой к 0,25 м/сек, и частотах пульсаций 3,35 и 6,7 гц коэффициент теплоотдачи мало отличается от максимального для этих частот. Так при $f=3,35$ гц и $w=0,25$ м/сек $\alpha_T = 173$ вт/м²град., а $\alpha_{T, \max} = 185$ вт/м²град., что имеет место при $w=0,51$ м/сек. В этом случае α_T уменьшилось всего лишь на 6,5%, а скорость снизилась в два раза.

При частотах пульсаций 10; 16,7 гц и малых скоростях фильтрации темп возрастания α_T более замедленный. С увеличением скорости фильтрации наблюдается обратная картина. Кривые зависимости α_T от w при больших частотах занимают промежуточное положение между кривой при продувании невозмущенным потоком и псевдооживления пульсирующим потоком на низких частотах. Чем больше частота пульсации, тем ближе кривая α_T подходит к кривой теплообмена стационарного режима, что свидетельствует о том, что повышение частоты пульсаций газового потока приближает режим теплообмена к стационарным условиям.

Влияние на теплообмен частоты пульсаций представлено на рис. 2а, из которого видно, что при скоростях фильтрации, меньших 0,3 м/сек, наибольшие значения α_T имеют место при частоте пульсаций $f=3,35$ гц. С дальнейшим возрастанием скорости максимальные значения коэффициента теплоотдачи смещаются в сторону больших частот.

На рис. 2б показано влияние пульсирующей подачи на эффективность теплообмена.

Из приведенных данных видно, что максимальное значение коэффи-

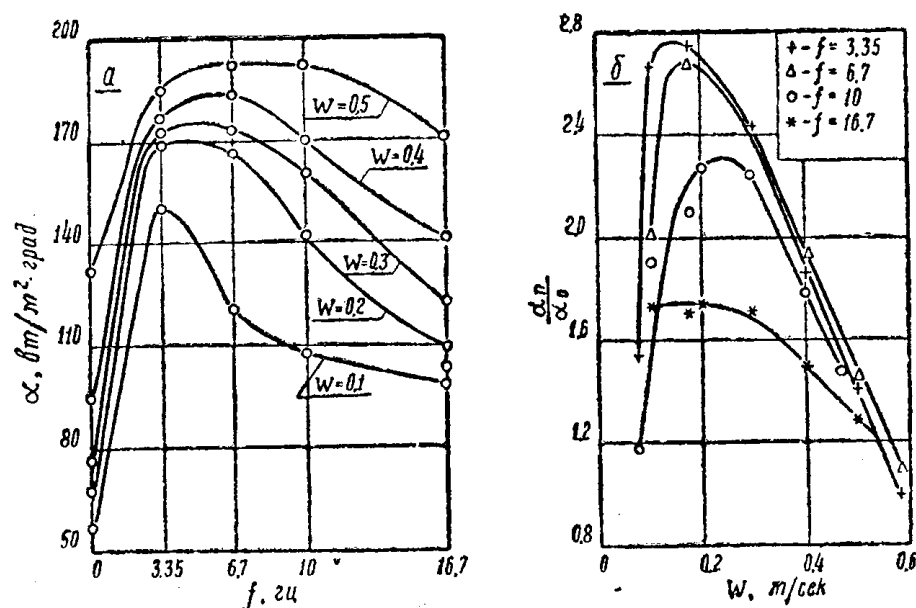


Рис. 2. Влияние скорости фильтрации и условий продувки на коэффициент теплоотдачи (а) и эффективность теплообмена (б)

$\alpha_{ст}$, α_n — коэффициенты теплоотдачи для стационарных и нестационарных условий. $f=3,35 \dots 16,7$ — частота пульсаций, гц

циента эффективности наблюдается при скоростях фильтрации, меньших $0,175 \text{ м/сек}$, и малых частотах пульсаций газового потока. Это является еще одним подтверждением преимуществ псевдоожигения зернистых материалов пульсирующим потоком.

Хотя с ростом скорости фильтрации и возрастают значения коэффициента теплоотдачи, но относительная эффективность пульсирующих воздействий снижается, приближаясь к единице.

Выводы

1. Выбранная методика исследований позволяет качественно и количественно оценить влияние режима и характера движения ожигающей среды на теплообмен слоя с поверхностью нагрева.

2. Максимальный коэффициент теплообмена при пульсирующей продувке слоя достигается при меньших на 30% скоростях, а численные его значения мало отличаются от соответствующих значений для слоя, продуваемого невозмущенным потоком.

3. Наибольший эффект от применения пульсирующего газового потока наблюдается при частотах 3,35; 6,7 *гц* и «разжиженном» состоянии слоя.

4. Численные значения коэффициента теплообмена при малых частотах пульсаций мало меняются в широком диапазоне скоростей фильтрации.

5. С повышением частоты пульсаций характер изменения коэффициента теплообмена приближается к таковому в условиях продувания слоя невозмущенным газовым потоком.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. Алексеев, В. И. Осин. Установка для исследования теплообмена дисперсного слоя с поверхностью. Настоящий сборник.
 2. С. С. Забродский. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожигенном (кипящем) слое. Госэнергоиздат, М., 1963.
 3. Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша. Основы техники псевдоожигения. «Химия», М., 1967.
-