

**ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА
НА ПОВЕДЕНИЕ СЛОЯ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА**

А. Д. АЛЕКСЕЕВ

(Представлена научным семинаром кафедр прикладной
и теоретической механики)

В различных отраслях промышленности получили широкое распространение аппараты, использующие псевдооживленный слой. Эффективность работы таких аппаратов в значительной мере предопределяется аэродинамическим режимом, поэтому выбор режима и его обоснование являются важнейшим элементом их конструирования.

В подавляющем большинстве эксплуатируемых аппаратов псевдооживленное состояние слоя достигается продувкой через него стационарного потока газовых смесей. Случаи применения нестационарного потока оживающей среды крайне ограничены [1], опыт их работы не обобщен [2]. Специальные работы, отражающие особенности аэродинамики нестационарных потоков в применении к процессам псевдооживления, отсутствуют.

В предлагаемой статье выясняется характер влияния нестационарных воздействий газового потока на некоторые параметры зернистого слоя.

Теоретические основы

При небольших значениях скорости восходящего потока, пропускаемого через слой зернистого материала, газ фильтрует через слой, не вызывая относительного перемещения частиц. В гидравлическом отношении такой слой представляет пористую среду и его состояние определяется режимом движения газа в поровых каналах. Последний может быть описан общими уравнениями движения жидкости по каналам [3, 4].

Если предположить, что движение газа одномерное, система энергетически изолирована, трение частиц газа друг с другом и со стенками отсутствует [5], то общие уравнения газовой динамики принимают вид:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + w \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + w \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad (1б)$$

$$p = A \cdot \rho^k, \quad (1в)$$

где w , p , ρ — соответственно скорость, давление и плотность газового потока;

x — положение рассматриваемого сечения;

τ — характеристическое время процесса;

k — показатель изэнтропы;

A — постоянная, характеризующая свойства газов.

Дальнейшие преобразования уравнений (1) проводим по методике Л. И. Кудряшева и А. А. Копотева [7].

Заменяем частные производные полными

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{\partial w}{\partial \tau} + w \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{\partial p}{\partial \tau} + w \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (3)$$

В уравнение (1а) подставляем значение величин из (2) и (3), делим на ускорение свободного падения тел— g и приводим его к виду

$$\frac{dw^2}{2g} + \frac{dp}{\rho \cdot g} = \frac{\partial p}{\rho \cdot \partial} \cdot \frac{d\tau}{\partial \tau}. \quad (4)$$

Интегрируем это уравнение с использованием (1в) для случая, когда изменение плотности газа существенно [7] и определяем скорость его движения в произвольном сечении слоя

$$w_2 = \sqrt{w_1^2 + \frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}. \quad (5)$$

При малых скоростях движения охлаждающей среды эффектом сжимаемости газа можно пренебречь и с достаточной для практических расчетов точностью пользоваться более простыми соотношениями, справедливыми для несжимаемой жидкости [8]. Для таких случаев

$$w_2 = \sqrt{w_1^2 + \frac{p_1 - p_2}{\rho}}. \quad (6)$$

Из формул (5), (6) видно, что скорость потока в поровых каналах слоя зависит от состояния газа на входе в слой и полноты его расширения за время движения между рассматриваемыми сечениями.

Левая часть уравнения (4) характеризует величину работы, которую может совершить газ при стационарном движении по участкам слоя, ограниченными сечениями „1“ и „2“. Правая часть уравнения (4) определяет величину той дополнительной работы, которую может совершить газовый поток за время τ , если он будет двигаться через рассматриваемый участок нестационарно.

Обозначим

$$\frac{1}{\partial} \int_0^{\tau} \frac{\partial p}{\rho \partial \tau} \cdot d\tau = \frac{\Phi(\tau)}{\partial} \quad (7)$$

и выразим скорость нестационарного движения газа в произвольном сечении слоя

$$w_{2н} = \sqrt{w_1^2 + \frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] + 2\Phi(\tau)} \quad (8)$$

или

$$w_{2н} = \sqrt{w_1^2 + \frac{p_1 - p_2}{\rho} + 2\Phi(\tau)}. \quad (9)$$

Уравнения (8), (9) подстановкой значений ω_2 из (5) или (6) приводятся к виду

$$\omega_{2н} = \sqrt{\omega_2^2 + 2\Phi(\tau)}. \quad (10)$$

В общем случае член $\Phi(\tau)$ может принимать любые значения (положительные, отрицательные, нулевые).

Из уравнений (5÷9) следует, что если отношение $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ для обоих потоков одинаково, а $\Phi(\tau) > 0$, то мгновенные значения скоростей движения в рассматриваемом сечении слоя при нестационарном истечении газа будут больше соответствующих скоростей стационарного движения. Это означает, что за счет нестационарности потока можно получить мгновенные значения скоростей газа, равные соответствующим скоростям стационарного движения при меньших перепадах давления $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.

Полученные соотношения будут справедливы для любого сечения слоя до момента перехода частиц в подвижное состояние. Так как состояние слоя определяется в основном мгновенными значениями скоростей потока, то на основании этих уравнений можно ожидать, что подвижность частиц при действии на слой нестационарного потока наступит при меньших по сравнению со стационарным расходах газа.

Для инженерной практики значительный интерес имеет величина мгновенного динамического импульса; поскольку она характеризует силы, которые действуют на частицы материала, вызывает разрыхление слоя и переход его из неподвижного в псевдооживленное состояние. Для рассматриваемых случаев истечения эти величины определяются выражениями:

$$\begin{aligned} P_n &= F \cdot \rho \cdot \omega_n^2, \\ P &= F \rho \cdot \omega^2, \end{aligned} \quad (11)$$

где F — свободное сечение каналов;

P_n, P — значения импульсов при нестационарном и стационарном истечении газового потока.

Полагаем, что в обоих случаях движения газа через слой, мгновенные значения плотности и суммарные сечения каналов остаются неизменными, и преобразовываем уравнение (11) подстановкой в него значения скоростей к следующему виду:

$$P_n = P \left[1 + \frac{2\Phi(\tau)}{\omega^2} \right]. \quad (12)$$

Из (12) видно, что при значении функции $\Phi(\tau) > 0$ величина импульса сил, действующих на слой со стороны нестационарного потока, будет больше, чем при стационарном его движении.

Это обстоятельство представляется исключительно важным с практической точки зрения, так как позволяет сделать вывод о том, что в установках псевдооживленного слоя, использующих нестационарные движения газа, процесс псевдооживления будет идти интенсивнее по сравнению с установками, использующими стационарный поток. Из анализа уравнений также следует, что характер силового воздействия потока на слой частиц, а следовательно, и эффективность такого воздействия в значительной мере зависят от вида функции $\Phi(\tau)$, и к ее выбору следует подходить особенно тщательно.

Для получения количественных данных была создана экспериментальная установка и проведены предварительные исследования по

ожигению различных материалов. Схема установки приведена на рис. 1.

Установка состоит из компрессора 1, ресивера 2, трубопроводов 3, 4 с встроенными диафрагмами 5 и 6, успокоительной емкости 7, пульсатора с приводом 8, пульсопровода 9 и аппарата 10. Привод пульсатора позволял получать синусоидальные импульсы в диапазоне частот от 0,5 ÷ 25 гц. Обводная линия 13, соединяющая успокоительную емкость с пульсопроводом, предназначалась для изменения первоначальной формы импульсной кривой добавлением в систему невозмущенного потока.

Аппарат включает стеклянную колонну 14, коническую воздушную коробку 15 и верхнюю съемную крышку 16. Система пьезометров и дифференциальных манометров обеспечивает замер осредненных значений давления во всех интересующих точках. Действительные значения давления замерялись измерительным зондом,

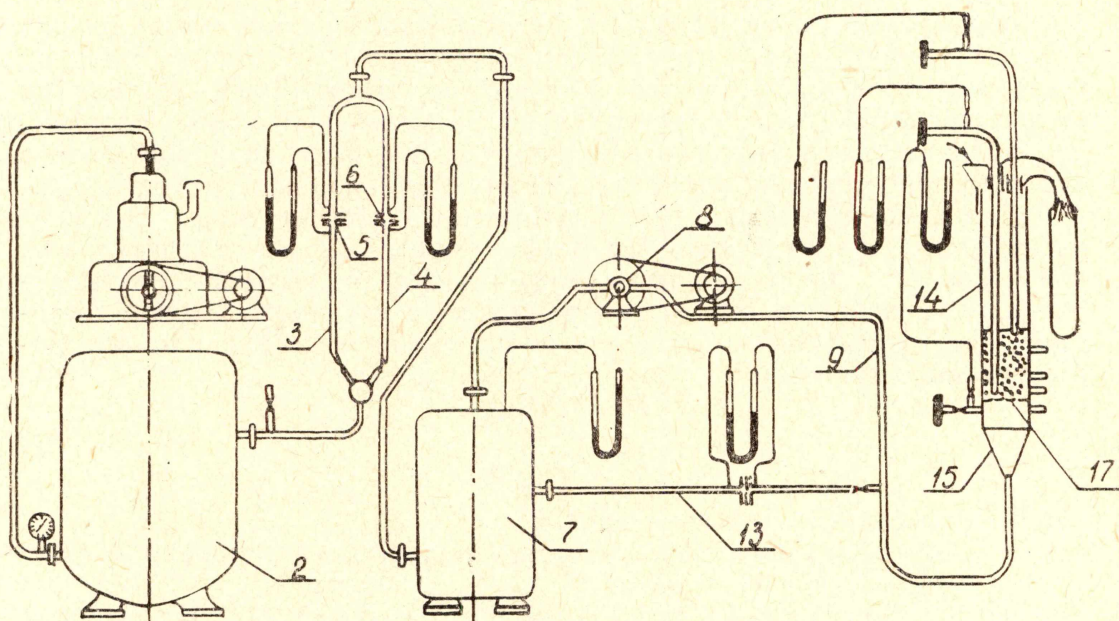


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

который состоит из импульсной трубки, вводимой в исследуемый участок колонны, переключателя и мембранного индикатора давления косвенного действия с проволочными тензодатчиками. Переключатель обеспечивал включение мембраны под нагрузку и одновременное отключение дифференциального манометра, замеряющего осредненные значения давления. Проволочные сопротивления в количестве 4 штук наклеивались по одному с каждой стороны мембраны и на внутренние поверхности камер. Два из них воспринимали деформации мембраны и являлись рабочими, а два других компенсационными. Такое размещение тензодатчиков давало возможность измерять как избыточные давления, так и разрежения с минимальной температурной погрешностью. Все сопротивления включались в мостовую схему тензометрической установки, собранной из типовой аппаратуры и состоящей из феррорезонансного стабилизатора напряжений, выпрямителя, многоканального электронного усилителя и магнитоэлектрического осциллографа. Исследуемый материал загружался внутрь колонны на распределительную решетку 17.

Методика и результаты эксперимента

Собранная установка подвергалась тщательной тарировке, в результате которой устанавливались закономерности изменения сопротивления отдельных элементов при стационарном движении воздуха и влияние на них нестационарности. Отдельной тарировке подвергались индикаторы давления. Деформации мембраны задавались статическим воздействием на нее невозмущенного потока газов.

В процессе опыта порции материала с известными характеристиками тщательно взвешивались и загружались в колонну. Объем, занимаемый материалом в колонне, доводился до объема, соответствующего его насыпному весу. Высота слоя при всех состояниях замерялась визуальным наблюдением по мерным линейкам, установленным с двух противоположных сторон колонны. За высоту принималось среднее арифметическое показаний мерных линеек. Скорость газа определялась делением расхода на площадь свободного сечения колонны. Водяными манометрами замерялось давление в успокоитель-

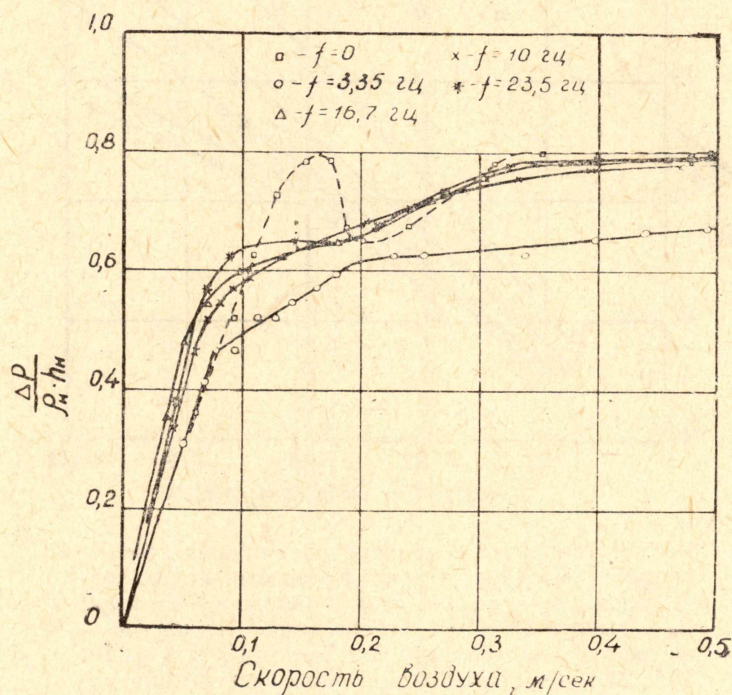


Рис. 2. Зависимость сопротивления слоя от скорости воздуха и частоты динамических воздействий. $f=0$. Поток стационарный. $f=3,35; 10; 16,7; 23,5$ — частота динамических воздействий, гц.

ной емкости, общее сопротивление слоя и сопротивление аппарата. В необходимых случаях манометры отключались и давление в соответствующих точках регистрировалось индикаторами и записывалось на пленку. Постепенно увеличивая расход газа, доводили слой до состояния интенсивного кипения, после чего расход снижали до нуля и возвращали слой в первоначальное положение.

На рис. 2 приведены кривые псевдооживления, полученные продувкой кристаллического сульфата аммония с насыпной плотностью $\rho_n = 0,9$ г/см³ и эффективным диаметром частиц $d = 0,45$ мм. Осредненные значения сопротивления слоя на всех режимах определялись по показаниям дифференциальных манометров. Частота пульсаций

устанавливалась по приставному измерителю оборотов и в случае записи импульсов на пленку контролировалась по отметчику времени осциллографа.

На рис. 3 приведены закономерности изменения степени расширения слоя для того же материала.

Из сопоставления кривых на рис. 2 и 3, полученных при неизменных формах импульса, следует, что закономерности псевдооживления и поведение частиц, образующих слой, зависят не только от скорости воздуха, но и от частоты динамического воздействия.

В результате опытов установлено, что в исследованном диапазоне частот осредненные значения сопротивления псевдооживленного слоя при нестационарном воздействии на него газового потока имеют

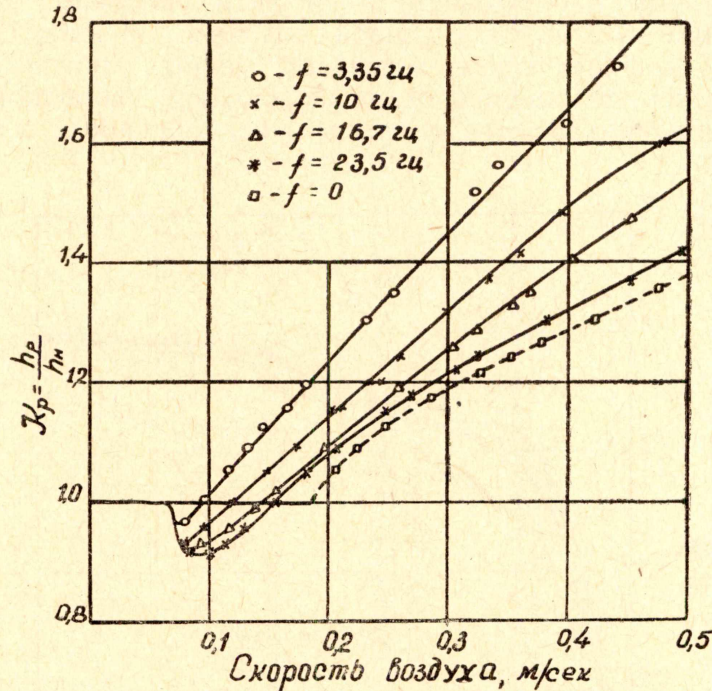


Рис. 3. Зависимость степени расширения слоя от скорости воздуха и частоты динамических воздействий. h_r — высота слоя в рабочем состоянии; h_n — высота слоя, соответствующая его насыпному весу. $f = 0$. Поток стационарный $f = 3,35$; 10; 16,7; 23,5 — частота динамических воздействий, $гц$.

меньшие значения, чем при действии стационарного потока. Разница в значениях тем заметнее, чем меньше частота пульсаций. Стадии псевдооживления предшествует уменьшение объема слоя, т. е. его уплотнение. Степень такого уплотнения зависит от частоты пульсаций и продолжительности их действия. Расширение слоя при неизменных осредненных расходах воздуха также зависит от частоты пульсаций, и оно тем выше, чем меньше частота пульсаций. Устойчивое псевдооживленное состояние слоя при действии на него нестационарным потоком воздуха наступает при меньших на 30—40% расходах.

Оптимальный диапазон рабочих частот устойчивого псевдооживления зависит от многих факторов.

Выводы

Нестационарность газового потока, создаваемая искусственным путем, является эффективным средством образования устойчивого

псевдооживленного слоя и приводит к существенному сокращению расхода оживающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Belik Luitfried. Chemie—Jngenieur—Technik, № 32, № 4, 235—257, 1960.
 2. Материалы 1-го международного конгресса в химической технике (chisa) в Брно. Инженерно-физический журнал, № 2, 1963.
 3. Н. И. Сыромятников, В. Ф. Волков. Процессы в кипящем слое. Металлургиздат, 1959.
 4. Макс Лева. Псевдооживление, Гостоптехиздат, 1961.
 5. К. П. Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды, 1955.
 6. Л. И. Кудряшев, А. А. Копотев. Теоретическое и экспериментальное исследование влияния нестационарности на процесс истечения в суживающих соплах. Тр. Куйбышевского авиационного института, вып. XII, 1961.
 7. А. Ш. Дорфман, М. М. Назарчук и др. Аэродинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. Изд. АН УССР, Киев, 1960.
 8. А. С. Ястржембский. Техническая термодинамика. Госэнергоиздат, 1960.
-