



УДК 628.512.002

М.Г. Зиганшин – кандидат технических наук, доцент**А.М. Зиганшин** – кандидат технических наук, доцент**Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)**

**ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ АВТОСЛОЯ
НА ТКАНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ.
ЧАСТЬ 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ
И ПРЕПЯТСТВИЯ В ПОТОКЕ**

АННОТАЦИЯ

Для уточнения характеристик фильтрации в пористом слое проведены численные исследования модели обтекания препятствия при помощи программного комплекса Fluent. Получены соотношения для определения фракционных параметров сепарации частиц из потока. Посредством сопоставления энергетических характеристик потока, частиц и межмолекулярных сил как дисперсионных взаимодействий получены также параметры, показывающие возможность удержания частиц препятствиями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Фильтрация, численные исследования, сепарация, фракционный параметр, энергетические характеристики.

M.G. Ziganshin – candidate of technical sciences, associate professor**A.M. Ziganshin** – candidate of technical sciences, associate professor**Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**

**THE HALF EMPIRICAL MODEL OF AUTOLAYER FORMATION
ON WEAVING FILTRATIONAL MATERIALS.
A PART 1. RESEARCH OF INTERACTION BETWEEN WEIGHED PARTICLES
AND OBSTACLE IN THE FLOW**

ABSTRACT

For specification of filtration characteristics in a porous layer the numerical investigations of model of obstacle flow by means of program complex Fluent are carried out. The ratios for fractional parameters definition of particles separation from a stream are received. By comparison of energy characteristics of stream, and particles, and intermolecular forces as dispersive interactions, the parameters, showing the possibility to retain the particles by obstacles, are also received.

KEYWORDS: Filtration, numerical investigations, separation, fractional parameter, energy characteristics.

Для фильтрации выбросов с дисперсными загрязнителями повышенной опасности, несмотря на значительные энергетические и материальные затраты, используются в основном волокнистые пористые среды. Принципиально они заменимы на тканые структуры, что открывает возможность радикального решения проблемы ресурсосбережения. Одна из сдерживающих причин кроется в отсутствии подходов к расчетам оптимальных параметров работы тканевых фильтров с реальной структурой, учитывающим образование автослоя. Это стохастический процесс, зависящий от дисперсного состава, слипаемости, морфологии и других свойств пыли, параметров потока, а также заметно меняющихся за срок эксплуатации свойств тканевой

подложки. В современной теории фильтрации рассматриваются характеристики эффектов, ведущих к столкновению частицы с препятствием, а энергетика их взаимодействия изучена пока недостаточно. Степень осаждения рассчитывается по эмпирическим зависимостям, полученным на моделях препятствий, превышающих размеры волокон и нитей фильтрующего слоя на 2-3 порядка и вносящих существенные возмущения в поток. При фильтрации в тканево-волокнистом слое размеры препятствий и взвешенных частиц сопоставимы, что позволяет ожидать соизмеримости вносимых возмущений. Поэтому характеристики сепарации частиц нуждаются в корректировке.

Уточненное изучение процесса обтекания препятствий размером менее 10^{-3} м может быть выполнено на основе численного эксперимента методами вычислительной гидродинамики. Были проведены численные исследования двумерной модели обтекания препятствия при помощи программного комплекса *Fluent*. Исследованы характеристики обтекания препятствий диаметром D_{ob} , равным 100, 200, 500 и 1250 мкм, в границах режимов, определяемых по числу Рейнольдса для препятствия Re_{ob} : от 0,1 (вязкий) до 1000 (переходный к потенциальному). Плотность воздуха $\rho = 1,225$ кг/м³, динамический коэффициент вязкости $\eta = 17,894 \cdot 10^{-6}$ Па·с. На рис. 1 представлено сравнение результатов опытов по М. Ван-Дайку ([1], фото № 42, Sadatoshi Taneda, 1956) и численного исследования обтекания препятствий, с диаметрами D_{ob} соответственно 0,5 дюйма и 500 мкм, при одинаковом режиме с $Re_{ob} = 26$.

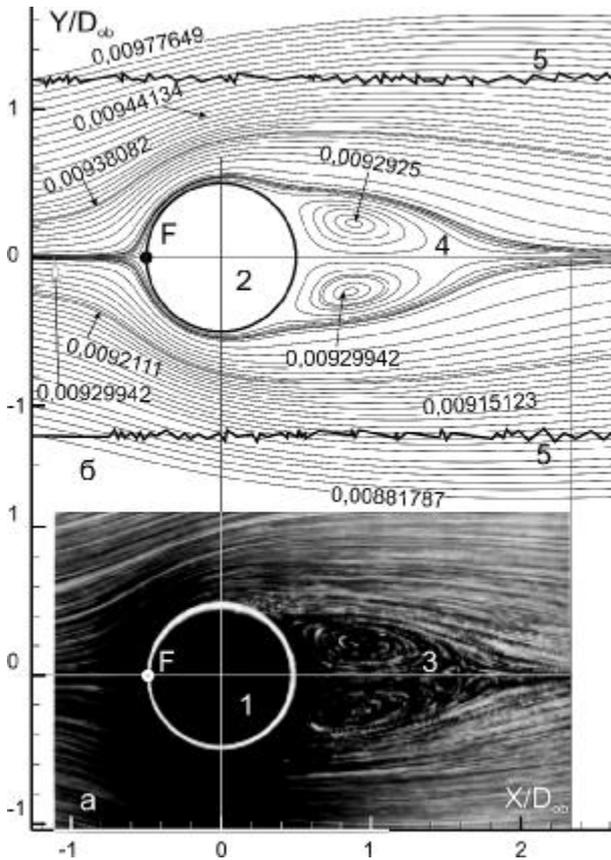


Рис. 1. Обтекание круглого цилиндра в натурном эксперименте по [1] (а) и по результатам численного эксперимента (б): 1, 2 – соответственно, модели препятствия диаметром 0,5 дюйма и 500 мкм; 3, 4 – зоны рециркуляции; 5 – границы зоны 3-кратной адаптации расчетной области в численном эксперименте

Линии тока на фото (рис. 1а) визуализированы с помощью алюминиевого порошка в воде. В обоих

случаях обтекание практически симметрично. Наблюдается совпадение опытных и расчетных линий тока перед препятствием, хорошее качественное и количественное соответствие контура рециркуляционной зоны. Опытные и расчетные относительные расстояния по потоку до центров вихрей, рассматриваемые М. Ван-Дайком как характерные для режимов обтекания в пределах $5 < Re_{ob} < 26$, различаются менее чем на 5%. Таков же порядок расхождения и других данных, полученных в численном эксперименте, что позволяет надежно рассчитывать по ним ряд необходимых количественных характеристик течения.

Исследованиями уточнена схема обтекания препятствий размером менее $1250 \cdot 10^{-6}$ м. При любом режиме линии тока изгибаются на расстоянии L не более чем за $1,5 R_{ob}$ до препятствия. По месту поворота перед препятствием скорость потока и радиусы изгиба линий тока растут от центра к периферии. Это позволяет представить математическую модель потока в виде совокупности некоторого числа линий тока, осесимметрично обращенных относительно касательных в точках поворота. В данной работе рассматривалась совокупность из 33 линий тока, которая включала центральную линию с радиусом изгиба $R_0 = 0$, а также по 16 следующих выше и ниже центральной. Ограничивают модель две характерные (базовые) линии тока, проходящие в невозмущенном потоке на $1/3 R_{ob}$ выше и ниже центра частицы. На рис. 1б это линии со значениями функций тока 0,0092111 и 0,00938082 кг/с. Радиусы их изгиба R_{16}, R_{32} были приняты за максимальные, с которых еще возможен сход частиц, а их положения считались крайними, с которых сошедшие частицы еще могли попасть на препятствие. Полученным данным соответствует модель вращения $uR^k = const$ с показателем степени $k \approx -0,84$. Она близка к модели вращательного движения с постоянной угловой скоростью («кваситвердого» вращения) $\omega = u/R = const$.

По данным численных исследований получен энергетический параметр, лимитирующий сепарацию взвешенных частиц из потока на повороте перед препятствием. В невозмущенном потоке расстояние между базовыми линиями тока равно $2R_{ob}/3$. Расход между ними на 1 м толщины потока $W = 2u_0 R_{ob}/3 = 1,69 \cdot 10^{-4}$ кг/с = $1,39 \cdot 10^{-4}$ м³/с. Расход между теми же базовыми линиями на повороте потока перед частицей определится интегрированием по местным скоростям:

$$W = 2 \int_0^{R_{16}} u dR = 1,087 u R^{-0,84} R_{16}^{1,84}. \quad (1)$$

По результатам исследований, при потенциальном режиме обтекания радиусы кривизны $R_{16} \approx R_{32} \approx 1,35 R_{ob}$. Тогда $u = u_0 (R/R_{16})^{0,84} / 2,2$, и радиальный градиент силы f_R с энергетическим параметром a_{rot} [2], можно представить для потока по месту



поворота перед препятствием в виде:

$$f_R = \rho_G u_0^2 R_{16} / 4,84 \text{ Па}\cdot\text{м} \quad (2)$$

$$a_{rot} = f_R / u_0 = \rho_G u_0 R_{16} / 4,84 \text{ Па}\cdot\text{с}. \quad (3)$$

Соотнеся a_{rot} с динамическим коэффициентом вязкости потока, получим энергетический параметр вращающегося потока Re_{rot} , обтекающего препятствие, который имеет структуру числа Рейнольдса:

$$Re_{rot} = a_{rot} / \eta = \rho_G u_0 R_{16} / (4,84 \eta). \quad (4)$$

Параметр Re_r , выражающий соотношение энергетических характеристик частицы и потока, получен как отношение квадрата инерционного числа

частицы $Re_p^{in} = \sqrt{3\pi} u_0 \tau_w / R_{16}$ к Re_{rot} :

$$(Re_p^{in})^2 / Re_{rot} = 0,141 \frac{u_0 \rho_p^2 D_p^4}{\rho_G R_{16}^3 \eta} = 0,141 Re_r. \quad (5)$$

Здесь $\tau_w = \rho_p D_p^2 / (18\eta)$ – время релаксации, с.

Величина Re_r показывает возможность сепарации частицы из криволинейного потока вследствие того, что она продолжает по инерции двигаться в прежнем направлении. Соотношение значений R_{ob} и R_{16} , определенное проведенными исследованиями, позволяет непосредственно сопоставить параметры Re_r и Stk . При вязком режиме обтекания R_{16} составляет от 4,4 до 2,25 R_{ob} , и $Re_r = (4 \div 8) D_p^2 Stk / R_{16}^2$. Сопоставление параметров Re_r и Stk при потенциальном режиме обтекания препятствий диаметром до 1250 мкм дает: $Re_r = 47,8 r_p^2 Stk / R_{16}^2$.

С учетом критического значения $Stk_{cr} \approx 1/8$

$$Re_r = (5,25 - 0,00318 R_{ob}) r_p^2 / R_{ob}^2. \quad (6)$$

Полученное выражение может быть использовано в качестве критической величины, определяющей фракционные параметры сепарации частиц из потока при развитом потенциальном режиме обтекания препятствий диаметром 1250 мкм и менее.

После схода с линий тока частицы, касаясь препятствия, могут удержаться на нем за счет взаимодействия молекул, расположенных на поверхностях, если межмолекулярные силы смогут противостоять действию потока на частицы. Рассматривая действие межмолекулярных сил упрощенно как вандерваальсовых, возникающих при нулевых колебаниях гармонических осцилляторов, можно представить условие образования максимально прочной связи между ними в виде равенства

$\lambda = e^2 / 2\pi\epsilon_0 r^3 m\omega_0^2 = \pm 1$ [3], где r – равновесное расстояние, м; m – приведенная масса осциллирующих атомов, кг; $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;

$\hbar = h / (2\pi)$ Дж·с – постоянная Планка, или квант

действия; $\omega_0 = \hbar / (m_e r_B^2) \text{ с}^{-1}$ – круговая частота колебаний зарядов несвязанных атомов на боровской орбитали с $r_B = 5,2917 \cdot 10^{-11}$ м; $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона.

Параметр λ можно рассматривать как безразмерное действие вандерваальсовых сил $a_{vdw} = e^2 / 2\pi\epsilon_0 r\omega_0$, возникающих при квантовых колебаниях электронных облаков возле центров положительных зарядов, масштабом которого принят механический момент количества движения данного атома по отношению к взаимодействующему с ним атому $a_{mec} = m\omega_0 r^2$. Энергия образовавшейся связи (эффективная энергия) определится как

$$E_{eff} = \hbar\omega_0 (1 - \sqrt{2}/2). \quad (7)$$

Равновесное расстояние, соответствующее условию $\lambda = 1$ как отношению величин a_{vdw} и a_{mec} , $r = 3,6164 \cdot 10^{-10}$ м. Итак, размеры зоны действия межмолекулярных сил определяются квантом действия, что служит теоретическим подтверждением опытных данных, свидетельствующих об их ограниченности. Результат может быть получен также решением уравнения Шрёдингера при помощи программы, приводимой в работе [4], с уточнением алгоритма по условию (7):

```
Sub; Dim K1(20), K2(20), K3(20), K4(20); Dim Y(20),
Y1(20), D(20), Y9(20)
NL=6.022E+23; DG=7.6064E-12; MY=0.504/NL; RG
=0.000000007412
AA=(2*3.1415926535)^2*131920000000000#*MY
*131920000000000# / 2; HH=6.626176E-27; N=2;
Y1(1)=InputBox("пси-функция", 1) Y1(2)=
InputBox("Производная пси-функции", 0)
A=RG;E=RG*5; N1=100; H=(E-R)/N1; GoSub
5100; Exit Sub
5100 For I=1 To N: Y(I)=Y1(I): Next I; For I9=0 To N1
-1: X=A+I9*H
X9=X: For I=1 To N: Y9(I)=Y(I): Next I; GoSub 10000
For I=1 To N: K1(I)=H*D(I): Next I;
X9=X+H/2: For I=1 To N: Y9(I)=Y(I)+K1(I)/2:
Next I; GoSub 10000
For I=1 To N: K2(I)=H*D(I): Next I
X9=X+H/2: For I=1 To N: Y9(I)=Y(I)+K2(I)/2:
Next I; GoSub 10000
For I=1 To N: K3(I)=H*D(I): Next I
X9=X+H: For I=1 To N: Y9(I)=Y(I)+K3(I)/2: Next
I; GoSub 10000
For I=1 To N: K4(I)=H*D(I): Next I; For I=1 To N
Y(I)=Y(I)+(K1(I)+2*K2(I)+2*K3(I)+K4(I))/6;
Next I; GoSub 6000 ' вывод
```

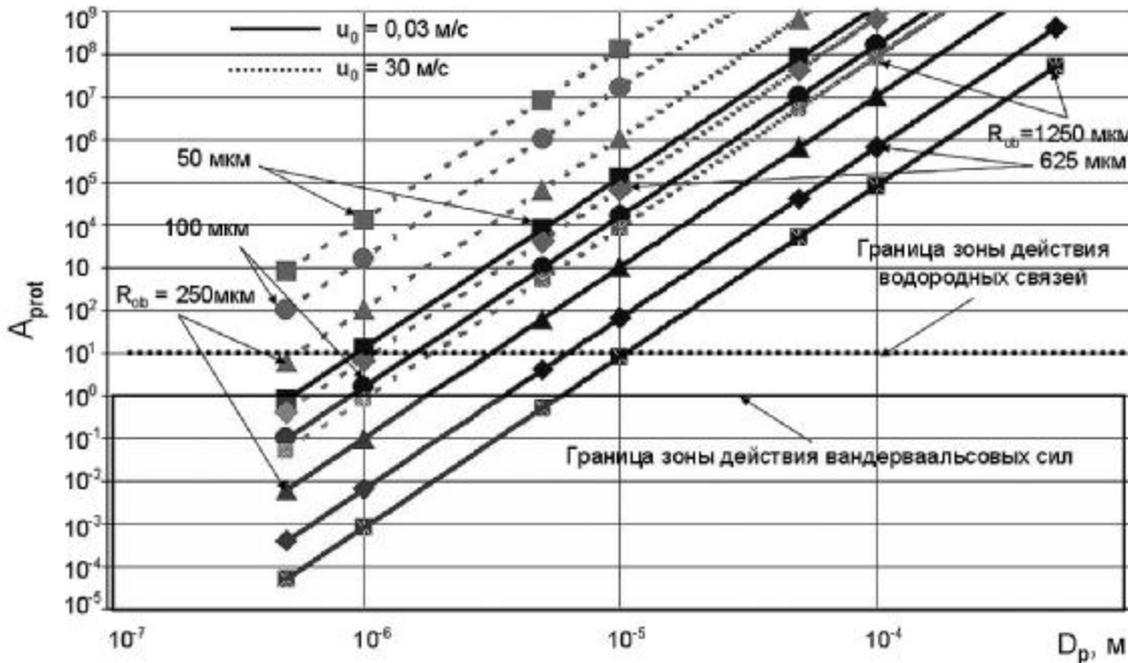


Рис. 2. Зависимость безразмерного энергетического параметра A_{prot} от скорости потока u_0 , м/с, и диаметра частиц D_p , м, при размерах препятствий R_{ob} от 50 до 1250 мкм

```

Next I9: Return; 6000 ' Вывод значения пси-функции
Debug.Print " PSI( "; X; ") = "; Y(1), EG, Y(2); Return
10000 ' задать правые части дифференциальных
уравнений
D(1) = Y9(2); D(2) = -(EG - FNV(X9)) * 78.952 * MY /
HH * Y9(1) / HH
Return; End Sub; Function FNV(R); FNV = AA * (R -
RG) * (R - RG)
End Function; ' DG = 7.6064E-12 ' Potential Pit Depth
for H2, erg
' MY = 0.504 / NL ' приведенная масса H2
' RG = 0.00000007412 ' equivalent internuclear
distance
' HH = 6.626176E-27 ' Plank`s Const., erg*s
' N = 2 ' Numb. dif. equal.
    
```

Полученное значение r также показывает, что расстояние, соответствующее максимуму энергии взаимодействия частицы и препятствия, ничтожно мало по сравнению с их размерами как макрообъектами. Поэтому критерий захвата частиц касанием, требующий прохождения частиц от края препятствия на расстоянии не более половины своего размера, является необходимым, но недостаточным условием осаждения. Необходимо еще оценить уровни энергии потока и взаимодействия элементов, находящихся на поверхностях частицы и препятствия. Для $N_A = 6,022 \cdot 10^{26}$ элементов, приходящихся на 1 кмоль вещества, величина взаимодействия $a_{p\mu} = N_A h = 3,99 \cdot 10^{-7}$ Дж·с/кмоль. Величина действия 1 кмоль потока $a_{rot\mu} = 22,4a_{rot} = 22,4Re_r \eta$ Дж·с. Энергетический параметр, показывающий

соотношение энергии потока и взаимодействия поверхностных элементов, можно представить как $A_{prot} = a_{rot\mu} / a_{p\mu} = 22,4a_{rot} / (N_A h) = 5,6 \cdot 10^7 Re_r \eta$. Параметр A_{prot} позволяет с достаточной для практических целей точностью прогнозировать возможность удержания частиц на препятствиях. Проведены расчеты величины A_{prot} в диапазоне скоростей потока $u_0 = 0,03 - 30$ м/с, диаметра частиц $(0,5-200) \cdot 10^{-6}$ м и диаметра препятствий 100-2500 мкм. Полученные данные (рис. 2) показывают, что препятствия с характерным для тканых фильтров размером $R_{ob} = 50$ мкм могут задерживать за счет действия сил водородных связей и вандерваальсовых сил частицы размером около 1 мкм при скорости не выше 0,03 м/с. Частицы со средним для промышленной пыли диапазоном размеров (около 10-40 мкм), могут удерживаться препятствиями с диаметром более 2,5 мм. В целом, возле нитей и волокон тканых фильтров, как препятствий диаметром менее 200 мкм, действие A_{prot} , приобретаемое частицами размером более 5 мкм за счет энергии потока, значительно превосходит действие межмолекулярных сил и превышающих их на порядок сил водородных связей. Удержание таких частиц в пористом слое после касания нитей и волокон может происходить только при существенном вкладе действия других составляющих. Вклад капиллярных сил непостоянен, а магнитных специфичен. Вклад электрических сил при отсутствии внешнего электрического поля не превосходит действия вандерваальсовых сил и может сказаться на задержании частиц до 5 мкм. Для удержания частиц крупнее 5 мкм на препятствиях диаметром до 200 мкм, как следует из рис. 2, потребуется высокопотенциальная энергия,



превосходящая вандерваальсово взаимодействие на 5-6 порядков. Энергия химической связи превосходит энергию межмолекулярной связи на 3-4 порядка. Следовательно, частицы крупнее 5 мкм не смогут удержаться на препятствии после его касания даже при условии образования хемосорбционной связи, что может иметь место при фильтрации в слое материалов из ионообменных волокон.

Таким образом, механизм осаждения взвеси в пористых фильтрах оказывается разным для частиц и препятствий различных размеров. Захват касанием можно считать основным фильтрующим эффектом для частиц размером менее 5 мкм. Они могут быть удержаны на препятствиях после их касания за счет вандерваальсовых сил и силы водородных связей. Частицы промышленной пыли среднего и крупного размера (10-300 мкм) могут задерживаться пористым слоем за счет ситового эффекта (отсева), и для них заведомо непригодны расчетные модели фильтрации в слоях с малой плотностью упаковки волокон. Необходима разработка методов расчета, учитывающих удержание взвеси в слое. Уточнения

расчетов осаждения имеют особое значение для повышения эффективности проектирования и эксплуатации систем обеззараживания приточного воздуха и производственных вентиляционных выбросов от радиоактивных, бактериологических и других опасных дисперсных загрязнителей.

Литература

1. Альбом течений жидкости и газа / Сост. М. Ван-Дайк. – М.: Мир, 1986.
2. Зиганшин М.Г., Ежов П.В., Дмитриев А.В. Эффективность очистки газовых выбросов парогенераторов ТЭС в аппаратах вихревого типа // Промышленная энергетика, 2008, № 9. – С. 49-54.
3. Зиганшин М.Г. Анализ упрощений в задачах межмолекулярного взаимодействия газа и поверхности // Известия КазГАСУ, 2008, № 2 (10). – С. 96-99.
4. Эберт К., Эдерер Х. Компьютеры. Применение в химии: Пер. с нем. – М.: Мир, 1988. – 416 с.