

Литература

1. Кожаметов М.К., Конысбеков К.Т., Омаров Е.О., Жолдасов А.А. Технология выращивания семян сахарной свеклы безвысадочным способом в условиях Жаркентской долины Алматинской области // (Рекомендации, г.Талдыкорган, 2004г. С.25
2. Садыков Ж.С. Потерснижающие жатвенные машины // Аналитический обзор. Алма-Ата 1992. С.6-7
3. Садыков Ж.С. и др. Прибор для определения осыпаемости семян // Осыпания изобретения № 17433461 А1. опубл.30.06.92

ҚАНТ ҚЫЗЫЛШАСЫНЫҢ ПІСКЕН УАҚЫТЫН АНЫҚТАУДЫҢ БІРІҢҒАЙ ҮДЕРІСІ

Мақалада Қазақстанда қант қызылшасының тұқымын жинау мәселесі қаралған және жинаудағы техникалық құралдар қарастырылған.

ON THE CULTIVATION OF SUGAR BEET IN KAZAKHSTAN

Summaru

The problems of the mechanism of the testes of sugar beet harvesting in Kazakhstan and tools for harvesting this crop.

УДК 621.762

Капцевич В.М., Мазюк В.В., Савич В.В., Корнеева В.К., Закревский И.В.

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Республика Беларусь, г. Минск

Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии», Республика Беларусь, г. Минск

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ С ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРОЙ ПОР

Аннотация. Разработана глобулярная модель пористого тела, позволяющая рассчитывать основные свойства порошковых фильтрующих материалов в зависимости от строения их поровой структуры. Приведены методики вывода уравнений для расчета структурных и гидродинамических свойств порошковых фильтрующих материалов. Выполнен расчет свойств однородных и градиентных структур.

Ключевые слова: порошковые фильтрующие материалы, градиентная структура пор, глобулярная модель, структурные и гидродинамические свойства.

Введение. Современные предприятия агропромышленного комплекса не могут обойтись без применения фильтрующих материалов, используемых как для достижения требуемого качества производимой продукции, так и для обеспечения безотказной работы

оборудования. Особое место среди этих материалов занимают фильтрующие материалы на основе металлических порошков, являющиеся монополюсной составляющей порошковой металлургии. Порошковые фильтрующие материалы (ПФМ), представляющие собой образованные порошковыми частицами пористые тела, обладают высокой тонкостью очистки и коррозионной стойкостью, способны подвергаться обработке резанием, давлением, пайке, склеиванию, многократной регенерации, устойчивы к резким колебаниям температуры.

Необходимым этапом при разработке новых процессов получения ПФМ является прогнозирование основных свойств разрабатываемых материалов (пористости, коэффициента проницаемости, размеров пор), которые непосредственно определяют эффективность их эксплуатации, в частности, при разработке получивших в последние годы наибольшее развитие методов создания ПФМ с градиентной структурой. К таким материалам, в первую очередь, относятся многослойные ПФМ, у которых каждый слой выполняется из порошков различного размера. По сравнению с изотропными материалами многослойные обеспечивают существенные улучшения комплекса эксплуатационных свойств, повышая эффективность применения и расширяя диапазон их использования. На рисунке 1 схематично представлены структуры ПФМ с градиентной структурой пор, полученные различными методами.

Результаты исследований. В данной работе предложена физико-математическая модель для описания структурных (пористости, удельной поверхности, размеров пор) и гидродинамических (коэффициент проницаемости) свойств ПФМ, основанная на глобулярном представлении пористого тела, которая, в отличие от известных [1, 2], состоит из сферических частиц различного диаметра и характеризуется функцией распределения частиц $f(D, x, y, z)$, где D — диаметр частиц; x, y, z — пространственные координаты. Эта функция при заданных значениях D, x, y, z показывает, какую часть элементарного объема δV с координатами центра x, y, z составляет объем dV_D , занимаемый частицами с диаметром в интервале $D, D + dD$, и определяется из соотношения:

$$dV_D(x, y, z) / \delta V(x, y, z) = f(D, x, y, z) dD. \quad (1)$$

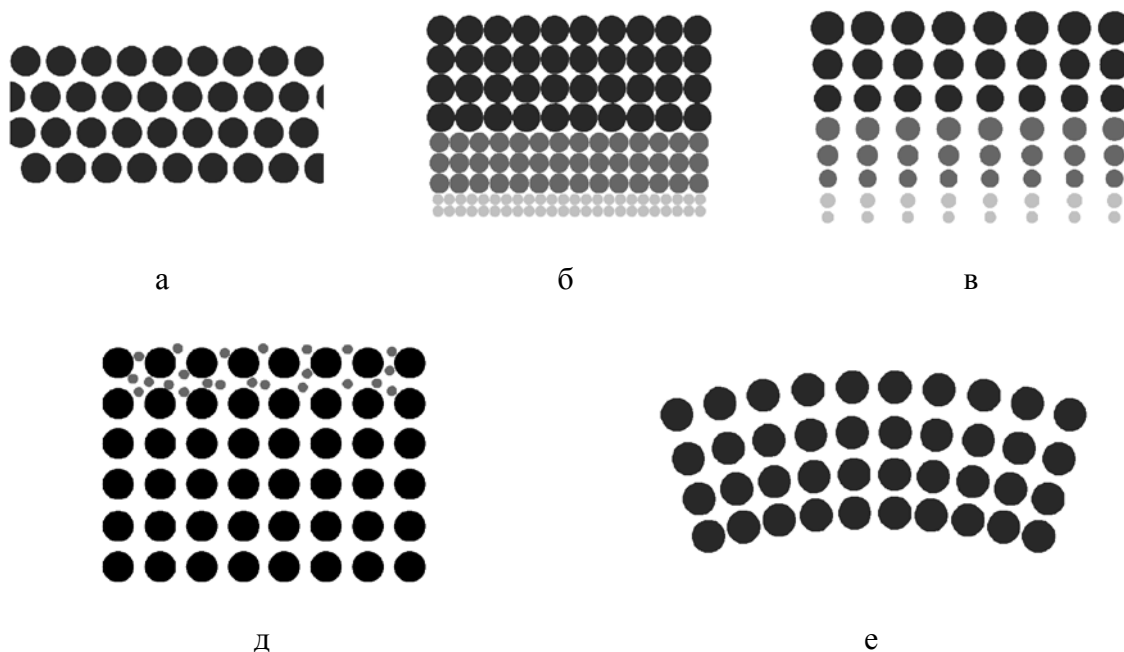


Рисунок 1 – Схематичное представление ПФМ с различной поровой структурой:

a-изотропная, б-многослойная, в-с плавно изменяющимися послойно размерами частиц, г-заполненная более мелкими частицами, -с плавно изменяющейся пористостью.

Величина $f(D, x, y, z)$ представляет собой объемную плотность $d\rho_D$ частиц с диаметром в интервале $D, D+dD$ в окрестности точки с координатами x, y, z :

$$f(D, x, y, z)dD = d\rho_D(x, y, z); \quad (2)$$

$$f(D, x, y, z) = d\rho_D(x, y, z) / dD. \quad (3)$$

В свою очередь:

$$\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} f(D, x, y, z)dD = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} d\rho_D(x, y, z) = \rho(x, y, z), \quad (4)$$

где D_{\min} , D_{\max} — соответственно минимальный и максимальный диаметры частиц, образующих пористую среду, а $\rho(x, y, z)$ — ее объемная плотность в окрестности точки с координатами x, y, z .

Определим значения величин пористости и удельной поверхности пористого тела, состоящего из частиц различного диаметра, которые характеризуются функцией распределения $f(D, x, y, z)$.

Выражение для определения пористости может быть записано в виде:

$$\Pi(x, y, z) = 1 - \rho(x, y, z) = 1 - \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} f(D, x, y, z)dD. \quad (5)$$

Для определения удельной поверхности пористого тела определим число частиц $dN_D(x, y, z)$, содержащихся в элементарном объеме δV с центром в точке x, y, z , диаметр которых находится в интервале $D, D+dD$:

$$dN_D(x, y, z) = dV_D(x, y, z) / V_D, \quad (6)$$

где $V_D = \pi D^3 / 6$ — объем, занимаемый одной частицей диаметром D .

Тогда

$$dN_D(x, y, z) = \frac{6f(D, x, y, z)\delta V(x, y, z)dD}{\pi D^3}. \quad (7)$$

Определим поверхность $dS_D(x, y, z)$ частиц, содержащихся в элементарном объеме δV и имеющих диаметр в интервале $D, D + dD$:

$$dS_D(x, y, z) = dN_D(x, y, z)S_D, \quad (8)$$

где поверхность одной частицы равна

$$S_D = \pi D^2. \quad (9)$$

Используя соотношение (7), выражение (8) запишем в виде:

$$dS_D(x, y, z) = \frac{6f(D, x, y, z)\delta V(x, y, z)dD}{D}. \quad (10)$$

Проинтегрировав последнее выражение от D_{\min} до D_{\max} и разделив его на δV , получим соотношение для определения удельной поверхности:

$$S_v(x, y, z) = 6 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{f(D, x, y, z)}{D} dD. \quad (11)$$

При использовании формулы (9) для вычисления поверхности одной частицы диаметром D предполагается, что она имеет идеальную сферическую форму и гладкую поверхность. Практически на поверхности имеются шероховатость, неровности и т.д., что значительно увеличивает поверхность частицы. Для учета указанных явлений введем фактор шероховатости $b(D)$, равный отношению величины поверхности реальной частицы диаметром D к величине поверхности гладкой сферической частицы такого же диаметра. Тогда поверхность одной частицы с учетом шероховатости будет равна

$$S_D = b(D)\pi D^2, \quad (12)$$

а поверхность ПФМ

$$S_v(x, y, z) = 6 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{b(D)f(D, x, y, z)}{D} dD. \quad (13)$$

Для определения вязкостного коэффициента проницаемости пористого тела воспользуемся известной зависимостью Козени, выражающей эту величину через Π и S_v :

$$k = \frac{0,5\Pi^3}{\xi S_v^2}. \quad (14)$$

В выражении Козени (14) параметр ξ называют коэффициентом извилистости поровых каналов и считают его постоянным. Введение этого параметра обусловлено отличием реальной пористой среды от модели Козени. В общем случае ξ является функцией пористости и диаметра частиц, образующих пористую среду:

$$\xi = \xi(\Pi, D). \quad (15)$$

Для ПФМ из бронзового порошка, полученных методом спекания со свободной насыпкой, зависимость (15) имеет вид

$$\xi = cD^{1/2}, \quad (16)$$

где коэффициент $c = 21,1 \text{ см}^{-1/2}$.

В общем случае, если пористость и удельная поверхность являются функциями координат x, y, z , то, как это следует из (14), коэффициент проницаемости k также будет функцией x, y, z . Для практики особый интерес представляют материалы с градиентной структурой пор, у которых Π, S_v , а следовательно и k , являются функцией лишь одной переменной (например, z). Для таких материалов коэффициенты проницаемости, определяемые при пропускании газа или жидкости вдоль оси z — k_{\parallel} и перпендикулярно этой оси k_{\perp} , не будут равны друг другу. Для пористого тела толщиной l_z в направлении оси z , имеющего переменную пористость $\Pi(z)$ и удельную поверхность $S_v(z)$, коэффициенты проницаемости k_{\parallel} и k_{\perp} соответственно будут равны

$$k_{\parallel} = \left[1/l_z \int_0^{l_z} dz / k(z) \right]^{-1}; \quad (17)$$

$$k_{\perp} = \frac{1}{l_z} \int_0^{l_z} k(z) dz. \quad (18)$$

Одной из важнейших характеристик ПФМ независимо от области применения являются размеры их пор. Следует отметить, что в настоящее время отсутствует теория для расчета размеров пор пористых тел, состоящих из частиц различного размера, случайно распределенных в его объеме. Однако для практики особый интерес представляют пористые тела, которые можно характеризовать отдельными участками: каждый участок отличается от других размерами частиц порошка, а в пределах одного участка располагаются частицы одного размера.

При определении размеров пор таких участков в рамках глобулярной модели можно воспользоваться, во-первых, известной формулой Козени [3]

$$d_n = \frac{2}{3} \frac{\Pi}{(1-\Pi)} D, \quad (19)$$

и, во-вторых, тем, что для правильной упаковки сферических частиц одного размера известно отношение диаметра поры в наиболее узком ее сечении d_n к диаметру частиц исходного порошка D как функции пористости (таблица 1) [2].

Таблица 1 – Зависимость d_n/D от пористости

Пористость, %	81,5	66	47,6	32	26
d_n/D	1,90	0,915	0,414	0,225	0,155

Представляя отношение d_n/D в зависимости от пористости Π в виде экспоненциальной и показательной функцией и определяя их коэффициенты методом наименьших квадратов, получим:

$$d_n / D = 2,43\Pi^{2,11}, \quad (20)$$

$$d_n / D = 0,052 \exp(4,402\Pi). \quad (21)$$

На рисунке 2 приведены результаты расчетов по формулам (19) – (21).

Анализ приведенных зависимостей показывает, что наилучшее совпадение с табличными значениями обеспечивает кривая 3, соответствующая выражению (21). Следует отметить, что коэффициент детерминации между рассчитанными по формуле (21) и табличными значениями составляет 0,99. Это свидетельствует о хорошей корреляции предложенной математической модели с табличными значениями.

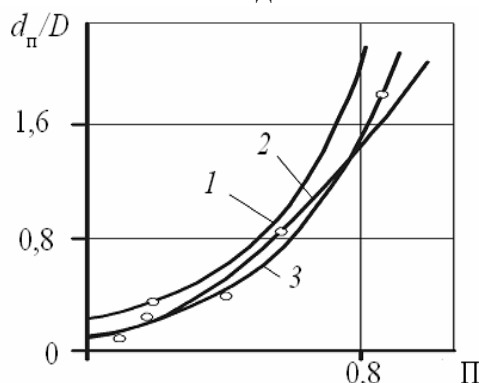


Рисунок 2 – Зависимости отношения d_n/D от пористости ПФМ, рассчитанные по формулам: 1 — (2.19); 2 — (2.20); 3 — (2.21)

Рассмотрим на конкретных примерах возможность реализации разработанной модели для расчета пористости, удельной поверхности, коэффициента проницаемости и размеров пор ПФМ с различной поровой структурой.

К материалам с однородной пористой структурой можно отнести ПФМ, полученные из порошков одного размера, а также из смеси порошков разного размера, равномерно распределенных в объеме ПФМ.

Функцию распределения частиц по размерам для ПФМ, состоящую из частиц одного диаметра D_0 можно представить в виде:

$$f(D, x, y, z) = (1 - \Pi) \delta(D - D_0), \quad (22)$$

где

$$\delta(D - D_0) = \infty \text{ при } D = D_0$$

$$\delta(D - D_0) = 0 \text{ при } D \neq D_0.$$

Подставляя выражение (22) в (11), получим

$$S_V = 6(1 - \Pi)/D. \quad (23)$$

Зная S_V и Π по формуле (14) определим коэффициент проницаемости:

$$k = (\Pi^3 D^2) / [72\xi(1 - \Pi)^2] \quad (24)$$

Более сложным примером однородной пористой среды является пористое тело, состоящее из равномерно распределенных в его объеме частиц двух размеров D_1 и D_2 . В этом случае функция распределения частиц по размерам может быть записана в виде

$$f = (1 - \Pi_1) \delta(D - D_1) + (1 - \Pi_2) \delta(D - D_2), \quad (25)$$

где

$$\Pi_1 = (V_T - V_{D_1})/V_T, \quad \Pi_2 = (V_T - V_{D_2})/V_T \quad (26)$$

здесь V_T — объем пористого тела; V_{D_1} и V_{D_2} — соответственно объемы, занимаемые частицами диаметрами D_1 и D_2 .

Для такого пористого тела

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 - 1, \quad (27)$$

удельная поверхность

$$S_V = \frac{6(1 - \Pi_1)}{D_1} + \frac{6(1 - \Pi_2)}{D_2}, \quad (28)$$

а коэффициент проницаемости

$$k = \frac{(\Pi_1 + \Pi_2 - 1)^3}{72\xi \left(\frac{1 - \Pi_1}{D_1} + \frac{1 - \Pi_2}{D_2} \right)^2}. \quad (29)$$

В выражении (29) коэффициент извилистости ξ вычисляется по формуле (15) в предположении, что $D = \min\{D_1, D_2\}$, так как частицы меньшего диаметра определяют форму поровых каналов.

Аналогично могут быть получены выражения для расчета характеристик пористого тела с однородной структурой, состоящей из частиц трех и более размеров.

Как отмечалось выше, к ПФМ с градиентной структурой пор, получивших наибольшее развитие в последние годы, и, как следствие, широкое применение в различных областях техники, относятся многослойные материалы.

Рассмотрим применение разработанной глобулярной модели пористого тела для расчета характеристик таких материалов на примере двухслойных. На рисунке 3 представлено сечение плоскостью xz двухслойного ПФМ, у которого толщина первого слоя равна h_1 , а второго — $h_2 - h_1$.

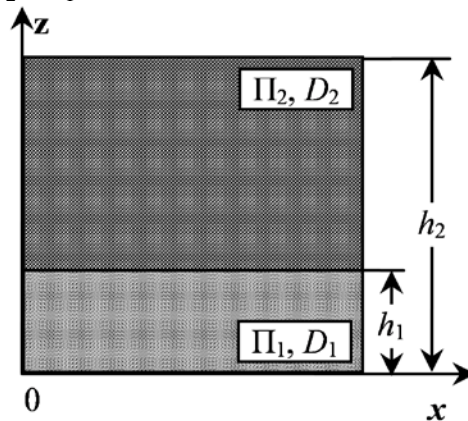


Рисунок 3 – Схема двухслойного ПФМ

Функция распределения частиц по размерам у такого материала имеет вид

$$f(D, x, y, z) = \begin{cases} (1 - \Pi_1)\delta(D - D_1) & \text{при } 0 < z < h_1; \\ (1 - \Pi_2)\delta(D - D_2) & \text{при } h_1 < z < h_2, \end{cases} \quad (30)$$

пористость определяется выражением

$$\Pi(z) = \begin{cases} \Pi_1 & \text{при } 0 < z < h_1; \\ \Pi_2 & \text{при } h_1 < z < h_2, \end{cases} \quad (31)$$

а удельная поверхность будет равна

$$S_v(z) = \begin{cases} \frac{6(1 - \Pi_1)}{D_1} & \text{при } 0 < z < h_1; \\ \frac{6(1 - \Pi_2)}{D_2} & \text{при } h_1 < z < h_2. \end{cases} \quad (32)$$

где Π_1 , Π_2 — пористости первого и второго слоев, образованных соответственно частицами с диаметрами D_1 и D_2 .

Коэффициент проницаемости также можно представить как функцию координаты z :

$$k(z) = \begin{cases} k_1 = \frac{\Pi_1^3 D_1^2}{(1 - \Pi_1)^2 72 \xi} & \text{при } 0 < z < h_1; \\ k_2 = \frac{\Pi_2^3 D_2^2}{(1 - \Pi_2)^2 72 \xi} & \text{при } h_1 < z < h_2. \end{cases} \quad (33)$$

Используя выражения (33) и (15) можно определить значения продольного k_{\parallel} и поперечного k_{\perp} коэффициентов проницаемости:

$$k_{\parallel} = \left[\frac{1}{h_2} \left(\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2 - h_1}{k_2} \right) \right]^{-1}, \quad (34)$$

$$k_{\perp} = \frac{k_1 h_1 + k_2 (h_2 - h_1)}{h_2}. \quad (35)$$

Рассмотрим применение разработанной модели для определения свойств пористого тела, состоящего из частиц одного размера (диаметр D_0), пористость которого изменяется вдоль оси z :

$$\Pi = \Pi(z). \quad (36)$$

Функция распределения частиц по размерам для такого пористого тела имеет вид

$$f(D, x, y, z) = [1 - \Pi(z)] \delta(D - D_0), \quad (37)$$

удельная поверхность пористого тела определяется из выражения

$$S_v = \frac{6[1 - \Pi(z)]}{D_0}, \quad (38)$$

а коэффициент проницаемости находится из уравнения

$$k_{\perp} = \int \frac{[1 - \Pi(z)]^2 72 \xi}{\Pi^3(z) D_0^2}, \quad (39)$$

будут функциями от z .

Несомненный интерес для теоретических исследований представляет пористое тело с градиентной поровой структурой, у которой крупнодисперсные частицы соединены друг с другом и образуют каркас с постоянной пористостью, а мелкодисперсные находятся в промежутках между крупными, причем пористость, образованная мелкими частицами, изменяется вдоль оси z . С одной стороны, такая среда может рассматриваться как результат разработки нового процесса получения ПФМ с градиентной структурой, с другой — как результат процесса фильтрации через ПФМ суспензии в процессе эксплуатации. По аналогии с выражением (37) функцию распределения частиц по размерам можно представить в виде:

$$f(D, x, y, z) = (1 - \Pi_1) \delta(D - D_1) + [1 - \Pi_2(z)] \delta(D - D_2), \quad (40)$$

где Π_1 , D_1 , и $\Pi_2(z)$, D_2 — соответственно пористость и диаметр крупных и мелких частиц.

Как и для пористого тела, состоящего из частиц двух размеров, равномерно распределенных в его объеме, искомые величины пористости, удельной поверхности,

коэффициента проницаемости могут быть определены из выражений (38) и (39). Однако в данном случае необходимо учитывать, что величины Π , S_V и k будут функциями z .

Для определения значений k_{\parallel} и k_{\perp} необходимо проинтегрировать выражения:

$$k_{\parallel} = \left[\frac{1}{l_z} \int_0^{l_z} \frac{72\xi \{ (1 - \Pi_1)D_2 + [1 - \Pi_2(z)]D_1 \}^2 dz}{[\Pi_1 + \Pi_2(z) - 1]^3 D_1^2 D_2^2} \right]^{-1}; \quad (41)$$

$$k_{\perp} = \frac{1}{l_z} \int_0^{l_z} \frac{[\Pi_1 + \Pi_2(z) - 1]^3 D_1^2 D_2^2 dz}{72\xi \{ (1 - \Pi_1)D_2 + [1 - \Pi_2(z)]D_1 \}^2}. \quad (42)$$

Как видно из рассмотренных примеров, разработанная глобулярная модель позволяет рассчитывать основные свойства ПФМ с различными поровыми структурами. Используя ее проведем сравнительный анализ однородных и градиентных материалов путем сравнения их параметров эффективности E_1 (отношение корня квадратного из коэффициента проницаемости к среднему размеру пор) [4].

На рисунке 4 приведены зависимости коэффициентов проницаемости от диаметра пор и параметра эффективности E_1 для ПФМ, состоящих из частиц одного размера с однородным порораспределением (кривая 1), двухслойных ПФМ (кривая 2) и ПФМ, в которых крупные частицы соединены друг с другом и образуют каркас с постоянной пористостью, а более мелкие находятся в промежутках между крупными, причем пористость мелких частиц изменяется вдоль направления фильтрования (ось z) (кривая 3). При расчете этих зависимостей в первом случае использовали ранее полученные выражения (24) и (21), в которых $\Pi=0,4$. Во втором случае использовали выражения (34) и (21). При расчете размера пор (21) в качестве определяющего выбирали размер в слое, состоящем из частиц наибольшей дисперсности, так как именно они определяют тонкость очистки, степень гомогенизации и другие характеристики при использовании фильтрующего материала. При расчете полагали, что $h_1:h_2=7:3$; $\Pi=\Pi_2=0,4$; $D_1/D_2 = 10$.

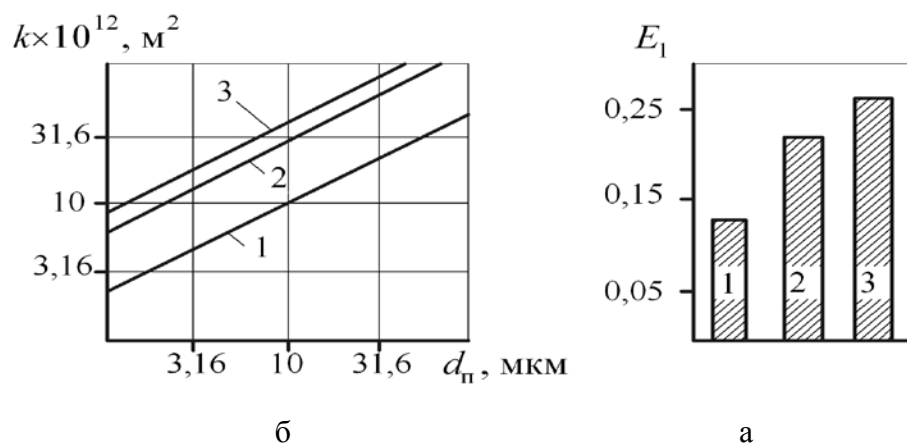


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента проницаемости от размеров пор (а) и параметра эффективности E_1 (б) ПФМ с однородной (1) и градиентной (2, 3) структурой пор.

В третьем случае использовали зависимости (39) и (21). Как и для двухслойного ПФМ при расчете размера пор, полагали, что он, во-первых, определяется минимальными размерами частиц, а, во-вторых, находится в сечении, где пористость $P_2(z)$ минимальна. В рассматриваемом случае $D_1/D_2=10$; $P_1=0,4$; $P_2=0,76$ на одной из граней ПФМ и увеличивается по толщине ПФМ до единицы по закону $P_2(z)=0,76+0,24(7z/3h)$.

Проведенные расчеты наглядно доказывают, что ПФМ с градиентной структурой обладают гораздо более высокой проницаемостью при сохранении тонкости очистки; при этом параметр эффективности E_1 возрастает почти в 2 раза.

Выводы. Разработана глобулярная модель пористого тела, состоящего из сферических частиц различного диаметра, описываемых функцией распределения. Модель позволяет рассчитывать основные свойства порошковых фильтрующих материалов в зависимости от строения их поровой структуры. На конкретных примерах приведены методики вывода уравнений для расчета структурных и гидродинамических свойств ПФМ. Выполненный расчет свойств однородных и градиентных структур, подтвердил преимущество последних.

Литература

1. Хейфец, Л.И. Многофазные процессы в пористых средах / Л.И. Хейфец, А.В. Неймарк. – Москва: Химия, 1982. – 320 с.
2. Карнауков, А.П. Глобулярная модель пористых тел корпускулярного строения. 1. Характеристика модели / А.П. Карнауков // Кинетика и катализ. – 1971. – Т. 12. – № 5. – С. 1235–1242.
3. Белов, С.В. Пористые металлы в машиностроении // С. В. Белов. Москва: Машиностроение, 1976. – 184 с.
4. Витязь, П.А. Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления / П.А. Витязь, В.М. Капцевич, Р.А. Кусин. Минск : НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.

V.M. Kaptsevich, V.V. Mazyuk, V.V. Savich, V.K. Korneeva, I.V. Zakrevskiy

MODELING STRUCTURAL AND HYDRODYNAMIC PROPERTIES OF POWDER FILTER MATERIAL WITH A GRADIENT PORE STRUCTURE

The globular model porous material is developed. The model allows the calculation of the basic properties of the powder filter materials depending on the design of their pore structure. The equations for calculating the structural and hydrodynamic properties are received. The calculation of the properties of homogeneous and gradient structures produced.