

УДК 628.512.002

Зиганшин М.Г. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: mjihan@mail.ru

Шаймуллина Э.А. – аспирант

E-mail: sh.elmira@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Параметры обтекания газовым потоком элементов структуры тканевого фильтра в CFD-модели

Аннотация

Проведены численные исследования фильтрации потока в пористой среде посредством методов вычислительной гидродинамики. Начальное состояние фильтровальной ткани моделировалось круглыми препятствиями диаметром 50 мкм в каналах шириной $2 \cdot 10^{-3}$ м и $2 \cdot 10^{-4}$ м. Определены скорость обтекания и толщина вязкого подслоя в зависимости от значения числа Рейнольдса для препятствия $Re_{об}$. Выявлены особенности обтекания препятствий в диапазоне размеров менее 10^{-3} м.

Ключевые слова: фильтрация, численные исследования, параметры обтекания, число Рейнольдса для препятствия, пограничный слой.

Фильтрация запыленного воздуха в тканевом фильтре – стохастический процесс, зависящий от множества различных характеристик потока, взвешенных в нем частиц и пористой среды. Параметры потока, лимитирующие обтекание препятствий в фильтрующей среде, такие как скорость, температура, влажность, начальное давление, тесно взаимосвязаны между собой. Температура и давление влияют на влажность и вязкость потока, а с последней связан характер распределения его скорости у поверхностей препятствий и ограждений. Поэтому далее для сокращения числа возможных сочетаний актуальных параметров в численном эксперименте давление, температура и средняя влажность приняты постоянными, а процесс – происходящим без фазовых переходов.

В задачах фильтрации запыленных потоков также важен учет основных свойств частиц (размера, плотности, концентрации) и пористой среды. В эксперименте изучалась возможность адекватного моделирования геометрии пористой среды тканевого фильтра в начальном состоянии. От него при неизменных характеристиках запыленности потока зависит скорость образования фильтрующего автослоя на ткани. В представленной статье обсуждаются результаты исследования зависимости таких параметров обтекания препятствий, как толщины и профиля скорости вязкого (ламинарного) подслоя, от входной скорости потока в канале, или от числа Рейнольдса для препятствий $Re_{об}$.

Параметры обтекания крупных препятствий (с диапазоном размеров от 10^{-3} м) исследованы достаточно полно. Установлено, что вязкий режим обтекания с параболическим профилем изменения скорости от поверхности препятствия к внешнему потоку наблюдается до значения $Re_{об} \approx 1$, а переход к потенциальному режиму обтекания завершается при $Re_{об} \approx 1000$. Обтекание же мелких препятствий размером $10^{-4} \dots 10^{-5}$ м исследовано значительно менее полно, хотя такой диапазон размеров достаточно специфичен: за его нижней границей (при размере препятствий порядка нескольких микрометров) поправка Каннингхема на несплошность потока уже перестает быть ничтожно малой величиной. Исследования параметров обтекания одиночных круглых препятствий в диапазоне размеров $5 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-4}$ м [1, 2] показывают существование ряда заметных отличий от параметров обтекания препятствий сантиметрового и дециметрового диапазона. Установление специфических особенностей обтекания группы мелких препятствий размером $10^{-4} \dots 10^{-5}$ м должно способствовать нахождению энергетически оптимальных режимов фильтрации.

Для достижения поставленных целей посредством методов вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) проведены численные исследования схем обтекания круглых препятствий диаметром 50 мкм в каналах шириной 2000 мкм и

200 мкм. Моделирование выполнялось на основе Рейнольдсова осреднения уравнений Навье-Стокса для потока с турбулентными пульсациями. Рассматривалось изотермическое двумерное течение в пределах значений $Re_{об}$ от 0,1 до 100. Сжимаемость потока газа не учитывалась, а его плотность и динамическая вязкость приняты постоянными и определены по воздуху для температуры 20 °С: $\rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Начальное состояние фильтровальной ткани моделировалось без учета ворсистости нитей круглыми препятствиями диаметром 50 мкм, расположенными в каналах шириной $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (рис. 1а) и $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ (рис. 1б). Пересечение осей координатной сетки находится в центре канала.

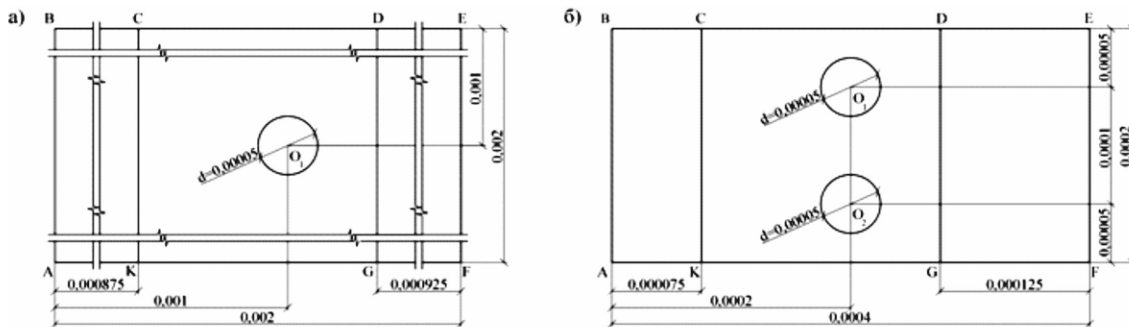


Рис. 1. Схема расположения препятствий в канале:

- а) схема обтекания потоком одиночного препятствия в канале размером 2000x2000 мкм;
б) схема обтекания потоком двух препятствий в канале размером 400x200 мкм

Центральная часть расчетной зоны за два диаметра до и на один диаметр после препятствий выделена для генерации более мелкой сетки с целью детального изучения характера течения непосредственно перед препятствиями, между ними, а также между ними и ограждениями. В области следа параметры течения рассматривались только непосредственно у поверхности препятствия. Цель изучения характеристик следа в целом не ставилась, т.к. это самостоятельная работа, требующая специфических предварительных исследований по устранению сеточной зависимости.

В первой серии испытаний изучались характеристики обтекания одиночного препятствия круглого сечения диаметром $D_{об} = 50 \text{ мкм}$, расположенного в центре канала шириной 2000 мкм с ограждениями, проницаемыми для потока (рис. 1а). Для этого при создании модели на ограждениях канала задавались такие же, как и на выходе из него, граничные условия pressure-outlet. Поверхность препятствия задавалась непроницаемой для потока (условие wall). Задачей данной серии испытаний было устранение влияния поверхностей соседнего препятствия и ограждения на параметры обтекания одиночного препятствия.

Поскольку эпюры скоростей по сечению канала симметричны относительно его оси, результаты испытаний на рис. 2 представлены только для верхней части канала. Они показывают, что расчетные установки, принятые для данной модели, позволили исключить влияние стенок канала на формирование пограничного слоя у препятствия. Стенки не оказывают влияния на распределение скорости и во внешней части потока. Полученные результаты представляют картину формирования течения в случае, когда поток ощущает действие вязких сил только со стороны препятствия. При вязком обтекании воздействие на поток крупных объектов сантиметрового диапазона сказывается в поперечном направлении на удалении 7-8 диаметров от препятствия, а далее практически достигается скорость невозмущенного потока w_{∞} .

Полученное в первой серии испытаний распределение скоростей в режиме вязкого обтекания круглого препятствия диаметром 50 мкм с $Re_{об} = 0,1$ ($w_{\infty} = 0,03012 \text{ м/с}$) представлено на рис. 2а. В свободной зоне между препятствием и стенкой канала скорость w растет по параболической зависимости, достигая на расстоянии от поверхности препятствия 345 мкм (т.е. около 7 диаметров) значения 0,0226 м/с, что составляет лишь 75 % w_{∞} , на расстоянии 585 мкм (~ 12 диаметров) – 81,3 % w_{∞} (0,0245 м/с), и на стенке канала – 87,5 % w_{∞} (0,0264 м/с).

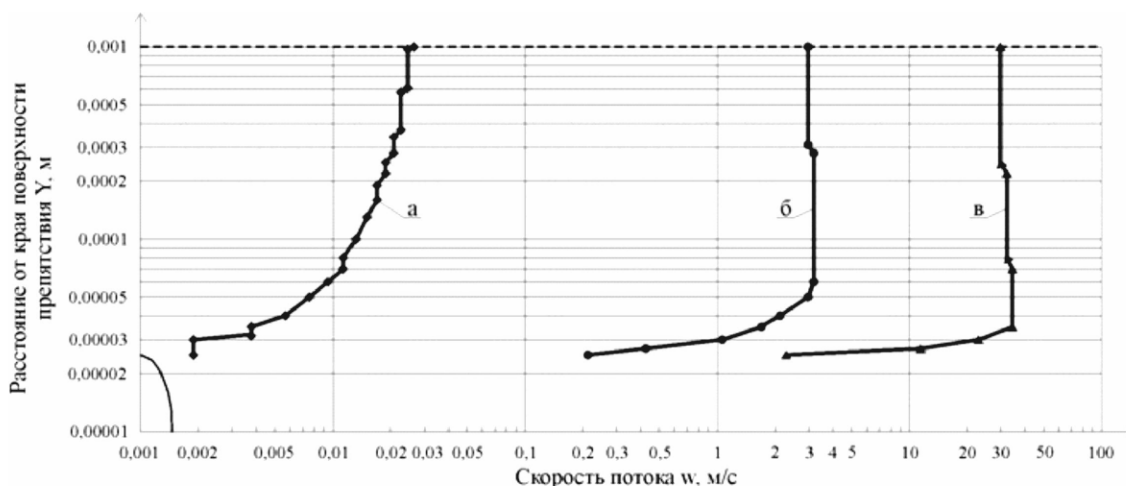


Рис. 2. Распределение скоростей при обтекании потоком одиночного препятствия с проницаемыми ограждениями при $Re_{об} = 0,1$ (а), $Re_{об} = 10$ (б), $Re_{об} = 100$ (в). Штриховой линией показана верхняя проницаемая стенка

Следовательно, скорость потока на удалении ~ 20 диаметров в поперечном направлении от обтекаемого препятствия размером $10^{-4} \dots 10^{-5}$ м еще заметно (на 12,5 %) отличается от скорости невозмущенного потока, что не характерно для обтекания крупных объектов (сантиметрового диапазона размеров).

Эпюра скоростей режима обтекания с $Re_{об} = 10$ (рис. 2б) показывает быстрое нарастание скорости в довольно тонком пристенном слое: поток достигает 99 % w_{∞} на расстоянии половины диаметра от поверхности препятствия. Далее скорость потока продолжает нарастать, и на расстоянии 0,7 диаметра от препятствия доходит до максимума, который перекрывает на 6 % начальную скорость. Затем на расстоянии более 5,5 диаметров скорость вновь снижается до 99 % w_{∞} и далее остается постоянной.

С увеличением $Re_{об}$ до 100 профиль изменения скорости в вязком подслое становится все более характерным для потенциального течения. Скорость потока уже на расстоянии 0,3 диаметра препятствия достигает максимального значения $w_{max} = 34,36$ м/с, которое превышает начальное w_{∞} на ~ 15 %. Затем на расстоянии 4,5 диаметра от поверхности препятствия скорость потока уменьшается до постоянного значения, составляющего 99 % скорости невозмущенного потока.

Данная серия испытаний также показала специфичность обтекания частиц микрометрового диапазона. При обтекании крупных объектов значение $Re_{об} = 10$ соответствует начальной области перехода от вязкого к потенциальному режиму, и для эпюры скоростей еще характерна параболическая форма роста скорости потока в достаточно толстом вязком подслое. Характер обтекания мелкого одиночного препятствия при тех же значениях $Re_{об}$ уже приближается к потенциальному. Одной из причин здесь может быть меньшая удельная затрата энергии в пристенном слое потока при обтекании мелкого препятствия вследствие меньшей толщины вязкой структуры (см. табл.).

Следующая серия испытаний в рамках проводимого численного эксперимента проведена на модели той же геометрии (рис. 1а), но при непроницаемых стенках канала. Целью исследования было выявление влияния удаленных стенок канала, как крупномасштабных объектов, на формирование потока и пограничного слоя около препятствий микрометрового диапазона размеров. Граничные условия те же, кроме верхнего и нижнего ограждений канала, которые в этом случае приняты непроницаемыми для потока (условие wall).

Как и в предыдущем испытании, распределения скоростей по сечению канала получились симметричными относительно его оси. На рис. 3 представлены эпюры скоростей для верхней части канала. Его сравнение с рис. 2 обнаруживает влияние стенок канала и на распределение скоростей потока, и на толщину пограничного слоя. В режиме вязкого обтекания (рис. 3а) при тех же значениях $Re_{об} = 0,1$ и скорости невозмущенного

потока $w_{co} = 0,03012$ м/с максимальная скорость в сечении канала w_{max} составила 0,04 м/с, что на 30 % превышает начальную скорость. Сравнение полученных результатов с режимом $Re_{об} = 0,1$ предыдущей серии (рис. 2а) позволяет выявить некоторые особенности структуры вязкого слоя при обтекании мелких и крупных объектов.

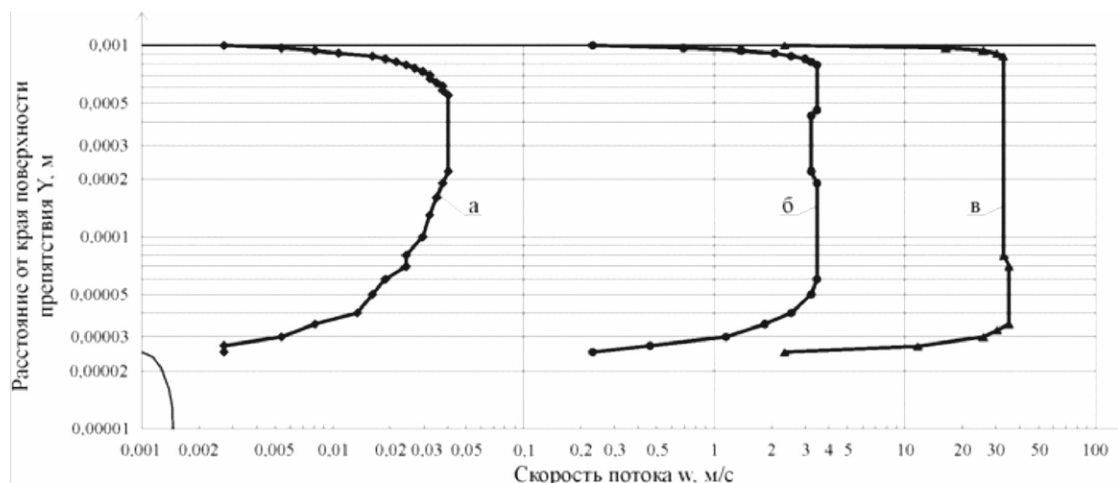


Рис. 3. Распределение скоростей при обтекании потоком одиночного препятствия с непроницаемыми ограждениями при $Re_{об} = 0,1$ (а), $Re_{об} = 10$ (б), $Re_{об} = 100$ (в)

У стенки, представляющей собой крупный объект сантиметрового диапазона размеров, эпюра скоростей в вязком слое (рис. 3а) располагается менее круто, чем у препятствия, оказывающего менее интенсивное сопротивление потоку. К примеру, поток достигает начальной скорости на удалении ~ 275 мкм от поверхности стенки, и порядка 80 мкм от поверхности препятствия, представляющего объект микрометрового масштаба.

Отсутствие (рис. 2а) или наличие (рис. 3а) стенки влияет и на толщину вязкого слоя у препятствия – при наличии стенки она уменьшается. Это может быть результатом стеснения вязкой структуры потока у препятствия энергетически более мощным вязким слоем стенки. На наличие энергетической интервенции со стороны стенки косвенно указывает и стеснение практически невязкого течения. Это проявляется в существенном сужении части потока с постоянным профилем скорости, которая из-за уменьшения сечения становится более чем на $\frac{1}{3}$ выше скорости невозмущенного потока.

В режимах обтекания с числами $Re_{об} = 10$ и $Re_{об} = 100$ влияние удаленных непроницаемых ограждений канала на скорость и толщину вязкого подслоя у препятствия оказалось значительно более слабым (табл., рис. 3б, в), ввиду чего это явление количественно не оценивалось. Обеспечить статистическую достоверность количественной оценки с погрешностью в пределах 5 % для этой серии исследований удалось бы при выполнении на порядок большего (от 50) числа испытаний. Это трудновыполнимо, а для данной серии, по-видимому, и нецелесообразно, поскольку полученные результаты однозначно обнаруживают наличие тренда на увеличение скорости потока и уменьшение толщины вязкого подслоя у препятствия при наложении на течение удаленных непроницаемых ограждений.

Таблица

Вид ограждения канала в серии испытаний	Максимальная скорость потока, м/с, при $Re_{об}$			Толщина вязкой структуры потока, мкм					
				у препятствия, при $Re_{об}$			у ограждения, при $Re_{об}$		
	0,1	10	100	0,1	10	100	0,1	10	100
Проницаемое	0,026	3,18	34,36	> 1000	35	15	-	-	-
Непроницаемое	0,040	3,46	35,08	195	35	10	450	210	120

Результатами данной серии испытаний также зафиксированы различия в переходе обтекания поверхностей стенок (как крупных объектов сантиметрового диапазона размеров) и препятствия (как мелких объектов микрометрового диапазона размеров) от

вязкого режима к потенциальному. Эти различия можно проследить по характеру изменения профиля скорости вязкой части потоков у ограждения и препятствия при увеличении значения $Re_{об}$ от 0,1 до 100 (рис. 3а, б, в).

В последней серии испытаний исследовалась схема обтекания потоком двух непроницаемых препятствий круглого сечения диаметром $D_{об} = 50$ мкм в прямоугольном канале 400×200 мкм (рис. 1б). Такая схема рассматривалась как приближенная к начальной структуре тканевого фильтра тем, что габариты портов пропуска потоков (проходов между непроницаемыми объектами) соизмеримы по размеру с препятствиями. В данной серии были приняты следующие граничные условия: вход в канал – velocity-inlet, выход из канала – pressure-outlet, ограждения канала и поверхности обоих препятствий – wall.

Распределения скоростей по сечению канала являются симметричными. Поэтому результаты данной серии приведены также только для верхней половины канала (рис. 4).

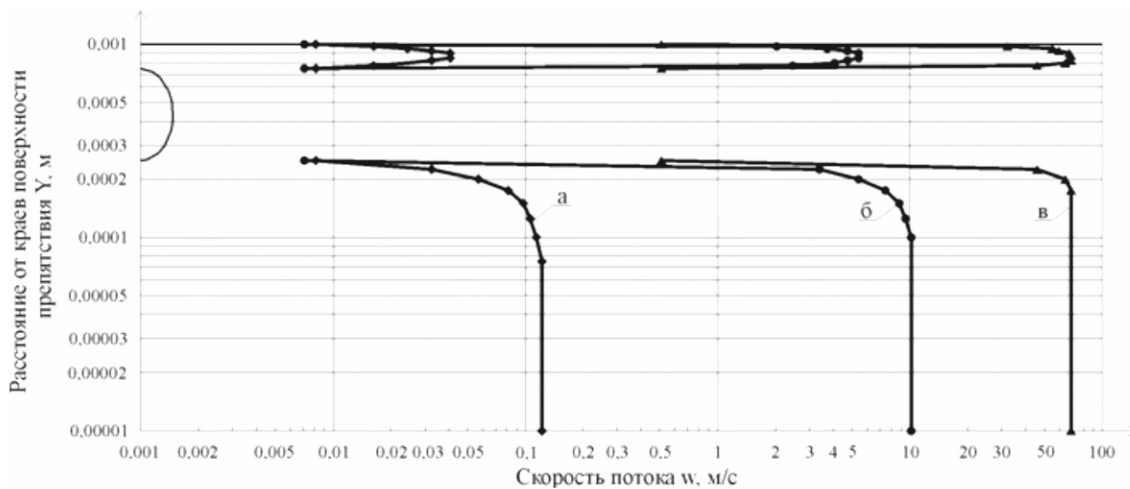


Рис. 4. Распределение скоростей при обтекании потоком двух непроницаемых препятствий при $Re_{об} = 0,1$ (а); $Re_{об} = 10$ (б); $Re_{об} = 100$ (в)

Сравнение с предыдущей серией (рис. 3) показывает, что приближение непроницаемой границы к препятствию оказывает влияние на профиль скорости у поверхности ограждения в режимах обтекания с числом $Re_{об}$ до 10 (рис. 4а, б). В режиме $Re_{об} = 100$ профили скоростей вязких структур у ограждения и препятствия сходны с профилями, полученными в серии с удаленными непроницаемыми ограждениями, а толщина вязкого подслоя минимальна (табл.). Однако в данной схеме вязкие структуры непосредственно взаимодействуют друг с другом и при этом режиме. Из-за сильной энергетической интервенции вязкого слоя ограждения зона действия вязкого подслоя у поверхности препятствия сокращается до 10 мкм, но продолжает частично перекрывать промежуток между препятствием и стенкой. Толщина вязкого слоя стенки в этом же режиме составляет 120 мкм (табл.), а значит, друг на друга взаимно влияют вязкие слои даже обеих стенок ограждения канала.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что при фильтрации с $Re_{об}$ вплоть до 100, т.е. до скоростей, превышение которых в тканевых фильтрах на практике не встречается, зон чистых потенциальных течений в пористой среде не бывает. Структура потока образуется как результат сложного взаимодействия большого числа вязких пограничных слоев у препятствий и ограждений, накладывающихся на отдельные участки потенциальных течений. Так, например, в рамках рассмотренной предельно упрощенной модели фильтрующих элементов из двух круглых препятствий микрометрового и двух плоских ограждений сантиметрового диапазонов размеров прохождение потока регулируется посредством взаимовлияния энергий четырех вязких пограничных слоев двух препятствий с одним потенциальным течением между ними, которые дважды перекрываются вязкими слоями противоположных ограждений. Очевидно, что с любым изменением геометрических характеристик системы изменится и энергетический баланс вязких структур потока.

Следовательно, параметры прохождения потока при фильтрации через пористую среду в определенной степени зависят от структуры фильтра, характерными параметрами которого при использовании тканых материалов являются расстояния между нитями (элементами), формы их сечения, способы сочетания, расположение относительно потока. Это предоставляет возможность оптимизации энергопотребления процесса фильтрации путем подбора оптимальных геометрических параметров пористой среды.

Список литературы

1. Еремкин А.И., Кошев А.Н., Зиганшин М.Г., Зиганшин А.М. Моделирование инерционного захвата частиц при фильтрации дисперсного потока // Региональная архитектура и строительство, 2008, № 1 (4). – С. 28-34.
2. Зиганшин М.Г., Зиганшин А.М. Полуэмпирическая модель образования автослоя на тканых фильтрационных материалах: Часть 1. Исследование взаимодействия взвешенных частиц и препятствия в потоке // Известия КазГАСУ, 2009, № 1 (11). – С. 181-185.

Ziganshin M.G. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: mjihan@mail.ru

Shaimullina E.A. – post-graduate student

E-mail: sh.elmira@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

The flow parameters of structure elements of a fabric filter by gas flow in CFD-model

Resume

The numerical researches of 50 micrometer in diameter obstacles model flow in channels $2 \cdot 10^{-3}$ m and $2 \cdot 10^{-4}$ m wide are carried out by means of the methods of computational fluid dynamics. The two-dimensional flow are considered at values of Reynolds number for an obstacle Re_{ob} equal 0,1, 10, 100. The obstacles are analogies of fibers and threads of fabric filters.

The purpose of the work was to determine the main parameters of the obstacles flow depending on Re_{ob} . The flow characteristics of a single obstacle, influence of adjacent elements (channel walls, neighboring obstacles) on formation of the flow and the boundary layer around the obstacles are studied as a result of the researches. Velocity of flow and thickness of viscous layer around the obstacles are determined. The features of the obstacles flow in the range of sizes less than 10^{-3} m are revealed.

As a result of the researches it is determined that the parameters of flow filtration in the porous medium change in the sufficiently wide range depending on its geometric characteristics.

Keywords: filtration, numerical researches, parameters of flow, Reynolds number for obstacle, boundary layer.

References

1. Eremkin A.I., Koshev A.N., Ziganshin M.G., Ziganshin A.M. The modeling inertial capture of particles at the filtration of the disperse flow // Regional architecture and construction, 2008, № 1 (4). – P. 28-34.
2. Ziganshin M.G., Ziganshin A.M. The on weaving filtration materials an autolayer formation half empirical model. A part 1. Research interaction of the weighed particles and obstacle in the flow // News of the KSUAE, 2009, № 1 (11). – P. 181-185.