

УДК 532.517.2; 66.067.124
PACS 47.10.ad, 47.11.-j

Очистка микроканала внешним ламинарным потоком

Л. С. Клименко^{1,2}, Б. С. Марышев^{1,2}

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН

614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1

² Пермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Букирева, 15

email: lyudmilaklimenko@gmail.com, bmaryshev@mail.ru

Работа посвящена исследованию процесса очистки микроканала, загрязненного осаждающимися на его стенки частицами примеси. Основной и самой распространенной причиной засорения микроканалов является сорбция частиц примеси стенками пор или «физическая сорбция». В настоящей работе описана задача о дрейфе твердых не взаимодействующих между собой частиц в микроканале, которые могут прилипнуть к его стенкам под действием сил Ван дер Ваальса и отрываться от стенки возникающим со стороны потока вязким напряжением. Между входом и выходом из канала задан постоянный перепад давления. В начальный момент времени стенки канала загрязнены налипшими частицами, т.е. стенки не ровные, что влияет на формирование структуры течения через канал. Со временем под действием вязких напряжений частицы отрываются от стенок канала, обуславливая его очистку. Учет взаимодействия оторвавшихся частиц с потоком производится в приближении Стокса. Кроме этого, в модели учтены случайные блуждания, вызванные диффузией. Задача решена численно в рамках модели случайных блужданий. Получена эволюция течения жидкости в канале при его очистке: поля функции тока, давления и завихренности. Определены зависимости концентрации осевших частиц от скорости потока и силы связи частиц со стенкой. Исследована зависимость расхода через поперечное сечение канала от концентрации осевших частиц. Произведены оценки времени очистки канала.

Ключевые слова: метод случайных блужданий; осаждение частиц; микрофлюидные системы; очистка микроканалов

Поступила в редакцию 06.04.2020; принята к опубликованию 21.04.2020

Microchannel cleaning by the external laminar flow

L. S. Klimenko^{1,2}, B. S. Maryshev^{1,2}

¹ Institute of Continuous Media Mechanics Ural RAS, Koroleva St. 1, 614013, Perm

² Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

email: lyudmilaklimenko@gmail.com, bmaryshev@mail.ru

The paper is devoted to study of the cleaning a microchannel contaminated by solute particles deposited on channel walls. The main and the most common cause of microchannel clogging is sorption of solute particles on channel walls or “physical sorption”. In this paper, we study the problem of the drift of solid non-interacting particles into a microchannel, which can stick to its walls due to Van der Waals interactions and break away from the wall due to viscous stress. A constant pressure drop is fixed between the inlet and the outlet of the channel. At the initial time moment, the channel walls are contaminated with ad-

hering particles, i.e. the form of walls affects the formation of the flow structure through the channel. Over time, under the action of viscous stress the particles detach from the channel walls, thus cleaning occurs. The interaction of the detached particles with the flow is taken into account within the Stokes approximation. In addition, the model takes into account random walks caused by diffusion. The problem is solved numerically in the framework of the random walk model. The evolution of the fluid flow in the channel during its cleaning is obtained. The dependences of the concentration of settled particles on the flow rate and the strength of the Van der Waals interaction between particle and wall are determined. The dependence of the flow rate through the channel cross section on the concentration of settled particles was investigated. The channel cleaning time was estimated.

Keywords: random walk method; particle deposition; microfluidic systems; microchannel cleaning

Received 06.04.2020; accepted 21.04.2020

doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-05-13

1. Введение

Засорение микроканалов из-за адгезии частиц на стенках является серьезной проблемой во многих процессах. Это различные фильтрационные системы – системы очистки воды, промышленные и бытовые фильтры, используемые, например, при катализе или жидкостной хроматографии. Обычно время работы фильтрующего элемента в конечном итоге ограничивается временем засорением фильтра. Другое применение, которое в настоящее время становится все более и более популярным, – это различные микрофлюидные системы, в которых частицы либо являются частью системы, либо присутствуют в форме пыли или других загрязняющих веществ. Способность поддерживать поток длительное время диктует полезность и срок службы микрофлюидных систем, поэтому сорбция частиц очень нежелательна [1]. Довольно часто для продления срока работы как фильтрующих, так и микрофлюидных систем используется их промывка достаточно мощным потоком рабочей жидкости. Жидкость при этом предварительно очищается от возможных примесей [2].

Существует несколько физических механизмов, приводящих к засорению микроканала. Самым простым случаем засорения является «механическая» закупорка, когда частицы попадают в канал, характерный зазор которого меньше их собственного размера [3, 4]. Такой подход имеющий экспериментальное подтверждение, описывает транспорт достаточно крупных частиц. Однако известно, что закупорка наблюдается даже тогда, когда через канал протекает суспензия, содержащая мелкодисперсные частицы.

Закупорка мелкими частицами часто объясняется образованием агрегатов, возникающих в результате межчастичного взаимодействия, и тогда «новая» более крупная частица может привести к механической блокировке [5]. Такое поведение наблюдалось экспериментально в разных областях канала (вблизи стенки и в объеме жидкости) и для частиц разных размеров [6, 7]. Позже было показано [8], что подход, основанный на модели дис-

кретных элементов (DEM), является более подходящим, позволяя отслеживать движение каждой отдельной частицы. Другим методом, который использовался для расчета образования трехмерных агрегатов микрочастиц, является численный метод силовой связи [9]. При этом механизм засорения канала исследуется для довольно крупных частиц, взаимодействующих друг с другом и с потоком. Авторы объясняют засорение с помощью взаимной агрегации частиц, но сорбция частиц на стенке и эффективное сужение реальных каналов не учитываются. Однако в ряде случаев именно сужение каналов за счет сорбции на стенке оказывается определяющим фактором, приводящим к закупорке каналов, что было показано в работе [10].

Также существует множество работ, посвященных исследованиям микрофлюидных устройств. Так, в работе [11] было экспериментально показано, что коллективные эффекты, например, образование агрегатов, не играют важной роли в засорении устройства. Одно из первых численных исследований осаждения частиц было выполнено в работе [12]. Авторы использовали модель адгезии/столкновения (JKR), которая учитывает образование и фрагментацию агрегатов, а также осаждение частиц на стенках канала. Однако влияние формы канала на поток не рассматривалось, такое влияние было учтено в работе [10].

Статья [10] посвящена исследованию засорения изначально чистого канала мелкодисперсной примесью с учетом взаимного влияния формы стенок (которая меняется при осаждении на них частиц) на поток жидкости, формирующийся в зазоре канала под действием внешнего перепада давления. В этой работе срыв частиц со стенок обеспечивается действием тепловых флуктуаций (сказывающихся на силе связи частицы со стенкой) и вязких сил, возникающих со стороны потока. Тот же подход развивается в настоящей работе для изучения возможности очистки закупоренного канала потоком чистой жидкости.

Таким образом, существует много экспериментальных и численных исследований микроканальной блокировки. При этом обратная задача очист-

ки каналов от мелкодисперсной примеси практически не исследована. Возможно, ее решение считается тривиальным обобщением задачи о закупорке каналов, однако, как показало настоящее исследование, очистка возможна далеко не всегда и представляет собой дополнительное самостоятельное исследование.

2. Постановка задачи

Рассматривается прямоугольный микроканал, заполненный вязкой жидкостью, на стенках которого находятся «прилипшие частицы». Таким образом, в начальный момент времени канал засорен примесью, частицы удерживаются на стенках и между собой с помощью сил Ван-дер-Ваальса. Вертикальный размер канала H горизонтальный L , в горизонтальном направлении осуществляется прокачка за счет постоянного градиента давления между входом и выходом: $\Delta P = P_1 - P_2 > 0$. Частицы могут срываться со стенок канала благодаря тепловым флуктуациям (случайной силе) и силам вязкого напряжения, действующим со стороны потока. Частицы отрываются от стенки, когда сумма напряжений (вязких и случайных) превышает силу связи со стенкой. Схема рассматриваемой задачи представлена на рис. 1.

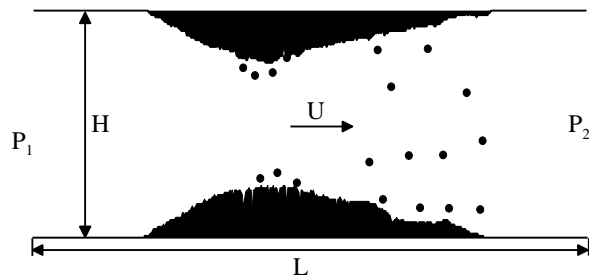


Рис. 1. Прямоугольный канал, «засоренный» примесью

Для расчета течения в канале со сложной формой стенки, образованной частицами, используется модель, разработанная в [10] для ламинарного течения вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{H^3 \rho}{\eta^2} \frac{P_1 - P_2}{8L} \ll 1.$$

Выберем масштабы давления, длины, скорости и времени следующим образом: $P_1 - P_2$, H , $(P_1 - P_2)H\eta^{-1}$, $8L^2\eta H^{-2}(P_1 - P_2)^{-1}$ где η, ρ – динамическая вязкость и плотность жидкости соответственно.

Задача, описывающая стационарное течение в терминах завихренности (φ) и давления (p), может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} &= 0, & \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} &= 0, \\ p|_{x=0} &= 1, & p|_{x=L} &= 0, & \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} \Big|_{y=S_l, S_u} &= 0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=0, L} &= 0, & & & & (1) \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} \Big|_{y=S_u} &= \frac{\partial p}{\partial \vec{\tau}} \Big|_{y=S_u}, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} \Big|_{y=S_l} &= -\frac{\partial p}{\partial \vec{\tau}} \Big|_{y=S_l}, \end{aligned}$$

где $S_l(x), S_u(x)$ – функции, задающие положение верхней и нижней стенок канала, $\vec{n}, \vec{\tau}$ – соответственно единичные вектора, направленные по нормали и вдоль стенки канала. При этом вектор скорости потока $\vec{U} = (u, w)$ жидкости может быть определен как решение следующей задачи:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} &= \frac{\partial p}{\partial x}, & \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} &= \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \varphi &= \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \\ \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{x=0, L} &= -\varphi|_{x=0, L}, & u|_{y=S_l, S_u} &= 0, & & (2) \\ \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{x=0, L} &= -\varphi|_{x=0, L}, & u|_{y=S_l, S_u} &= 0, \\ w|_{x=0, L} &= 0, & w|_{y=S_l, S_u} &= 0, \end{aligned}$$

Как показано в [10], для частиц размером $a \ll a_c = 18\pi\eta^2 H^2 / \rho_p k_B T$, где ρ_p – плотность материала частиц, k_B – постоянная Больцмана, T – температура, доминирующим механизмом переноса является перенос частиц потоком жидкости. В этом случае уравнения движения частицы могут быть записаны в следующей форме:

$$\begin{aligned} x &= tu(x, y, t) + af_x(t), \\ y &= tw(x, y, t) + af_y(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где a – характерный размер частицы, (f_x, f_y) – вектор случайных величин, распределенных по нормальному закону. Поскольку рассматривается очистка канала, частица может начать дрейфовать в потоке только после отрыва от стенки, условия отрыва согласно работе [10] могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} \sigma|_{y=S_l} &= \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} + \sigma_T f_l > \sigma_c, \\ \sigma|_{y=S_u} &= -\frac{\partial u}{\partial \vec{n}} + \sigma_T f_u > \sigma_c, \end{aligned} \quad (4)$$

где f_u, f_l – независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону, $\sigma_T = 3k_B T / \sqrt{2a^5 H}$ – характерное значение случайных напряжений возникающих из-за тепловых флуктуаций, $\sigma_c = 2A / 27a^3$ – характерное значение критических напряжений на отрыв (сила связи, обусловленная Ван-дер-Ваальсовым взаимодействием), A – константа Гамакера, электрического взаимодействия материала стенки и частицы [13]. Для большинства материалов значения константы Гамакера меняются в диапазоне $10^{-19} \div 10^{-21}$ Дж. Таким образом, единицы измерения для напряжений выберем следующим образом:

$$[\sigma_T] = \frac{3k_B T}{P_1 - P_2} \sqrt{\frac{1}{2a^5 H}},$$

$$[\sigma_c] = \frac{2A}{27a^3 (P_1 - P_2)}.$$

Безразмерное значение критических напряжений может меняться в широком диапазоне за счет изменения константы Гамакера. Для микроканала с характерным размером $H \sim 10$ мкм, стенки которого состоят из диоксида кремния (SiO_2) и частиц кристаллического кремния (Si) характерным размером $a \approx 10^{-7} \text{ м} \ll a_c$ при характерных перепадах давления $P_1 - P_2 \approx 1$ Па можно получить следующие оценки для безразмерных параметров: для воды $\text{Re} \approx 0.01$, $\sigma_T \approx 0.2$ при температуре $T = 300$ К, $\sigma_c \approx 0.27$, константа Гамакера для приведенных материалов $A \approx 3.6 \cdot 10^{-21}$ Дж.

3. Метод решения

В расчетах рассмотрен канал соотношением сторон $L / H = 5$. Задача решается на равномерной сетке, при этом на единицу длины задается 100 узлов сетки, таким образом, канал покрыт сеткой 500×100 узлов. Частицы считаются одинаковыми, их размер 1×1 , т.е. частица занимает один узел сетки. Самосопряженная задача (1) решается численно с дискретизацией конечными разностями второго порядка точности. Предполагается, что отрыв частиц происходит достаточно медленно, для полученного стационарного потока проверяются условия (4) для каждого узла вдоль текущего положения стенки. Затем в тех узлах, где условие выполнено, осуществляется отрыв частицы от стенки. При этом координата стенки сдвигается на один узел и рассматривается перенос частицы с потоком с учетом случайных скачков, вызванных тепловыми флуктуациями (диффузия). При этом частица может снова подойти вплотную к стенке (если в какой-то момент совершит скачок в сторону стенки), в этом случае происходит ее прилипание к стенке в новом месте, координата стенки в данном узле смещается на один узел, а расчет движения частицы приостанавливается. Однако

частица может достигнуть выхода из канала, не приблизившись к стенке, тогда данная частица считается вылетевшей из канала и расчет тоже приостанавливается. Данная процедура повторяется для всех узлов вдоль стенки, где были выполнены условия (4). В результате форма стенок канала немного изменяется, после чего происходит новый расчет стационарного течения со слегка изменившейся геометрией канала. При этом предыдущее распределение полей завихренности и давления берется в качестве начального приближения, поскольку геометрия меняется слабо, а задача (1) решается итеративным методом, расчет довольно быстро сходится (обычно требуется 3–5 итераций). При такой схеме расчета предполагается, что частицы отрываются достаточно редко и не воздействуют друг на друга в потоке. В работе [10] показано, что такое приближение оправдано для частиц размером $a \ll a_c$. Время процесса на каждом шаге определяется как время, максимальное из всех времен необходимых частицам на их «путешествие» от момента отрыва до выхода из канала или прилипания в другом месте при решении уравнений движения (3). При этом, как показано в [10], наиболее оптимальный шаг по времени (для решения уравнений (3)) дается соотношением $\delta t = 3\pi\eta a^3 / 2k_B T$.

Поскольку расчет течения производится итеративным методом, то для сходимости необходимо иметь адекватное начальное приближение. Если начальное распределение частиц в «загрязненном» канале задать случайным образом, то получить начальное распределение давления и завихренности не представляется возможным. Поэтому для «приготовления» начального распределения частиц используется описанная выше схема, но без использования условий (4), т.е. в предположении, что частицы не отрываются от стенок. На каждом шаге, на входе в канал случайным образом задается положение частицы, после чего рассчитывается ее дрейф в потоке, до момента прилипания к стенке или выхода из канала. В случае прилипания течение в канале пересчитывается и запускается новая частица. В этом случае на первом шаге канал полностью чистый, а течение в нем является паузейлевским, т.е. в качестве начального приближения для давления и завихренности можно выбрать следующие соотношения:

$$p = 1 - \frac{x}{L}, \quad \varphi = \frac{1}{2} - \frac{y}{L}. \quad (5)$$

Расчет «загрязнения» канала заканчивается при достижении критического зазора, расстояния между верхней и нижней стенками при котором поток жидкости через канал падает в 10 раз (когда уже нельзя использовать приближение невзаимодействующих частиц в потоке).

4. Результаты

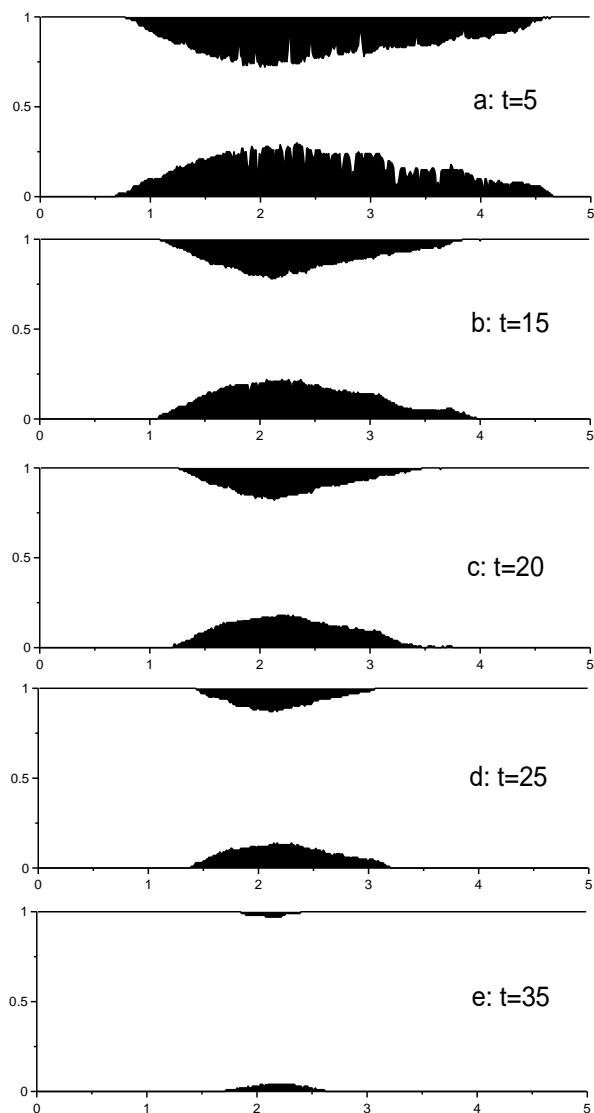


Рис. 2. Положение стенок канала, загрязненного примесью; черным заштрихована область занятая частицами примеси. Фрагменты рисунка а–е соответствуют различным моментам времени от $t=5$ до $t=35$, для каждого фрагмента момент времени подписан на рисунке. Полная очистка канала была достигнута в момент времени $t \approx 37.35$

Динамика выноса примеси из канала при $\sigma_T = 0.2$ и $\sigma_c = 0.1$ показана на рис.2. Видно, что внешний поток со временем очищает канал, однако при увеличении силы связи частиц, т.е. увеличении параметра σ_c , скорость очистки канала сильно замедляется. Этот эффект может быть проиллюстрирован рис 3, где показана зависимость объемной концентрации осевшей примеси ($Q = V_p / V$, где V_p – объем, занятый осевшей примесью, V – объем всего пространства канала) от времени для различных значений параметра σ_c . Все

интегральные характеристики процесса, представленные на рис. 3–7, получены путем осреднения результатов по 21 реализации (поскольку процесс существенно случаен).

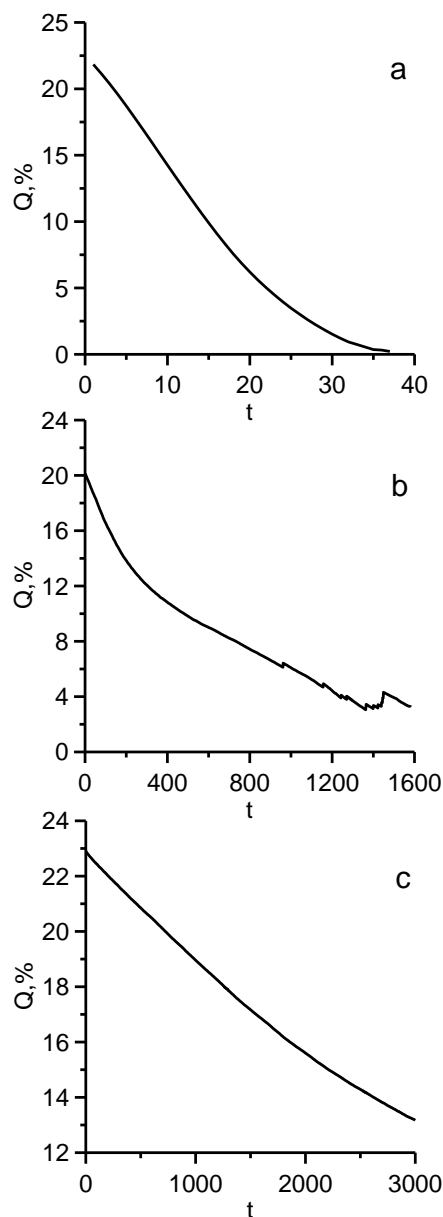


Рис. 3. Графики зависимости объемной концентрации осевшей примеси Q от времени для различных значений параметра σ_c : а – 0.1; б – 0.3; в – 0.4

Из рис. 3 видно, что с ростом σ_c очистка канала сильно замедляется, так при $\sigma_c = 0.3$ канал уже не может очиститься полностью, а значение концентрации долгое время остается на уровне около $Q = 4\%$. Для больших значений σ_c очистка происходит крайне медленно. Наиболее ярко этот эффект виден на зависимости зазора канала ($d = l_m / H$, где l_m – минимальное расстояние между верхней и нижней границами) от времени, представленной на рис. 4.

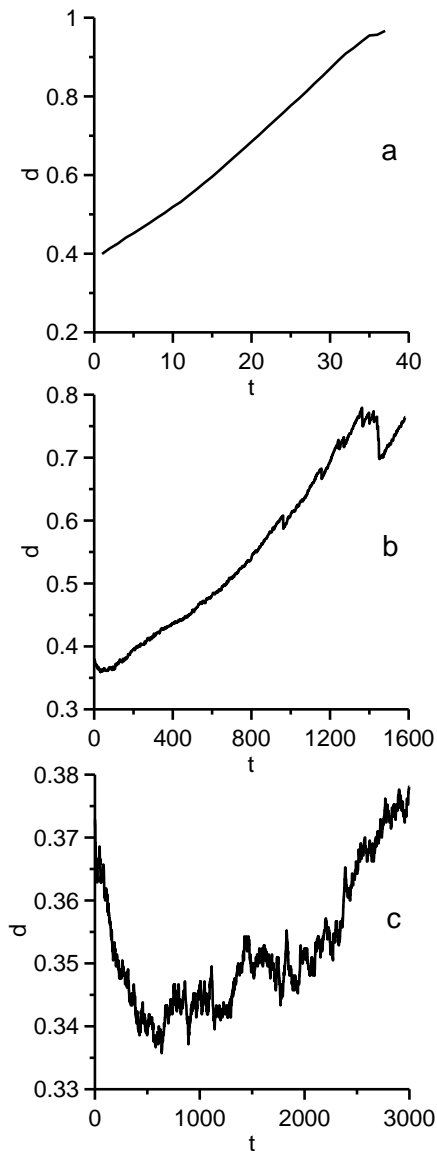


Рис. 4. Графики зависимости безразмерного зазора канала d от времени для различных значений параметра σ_c : а – 0.1; б – 0.3; в – 0.4

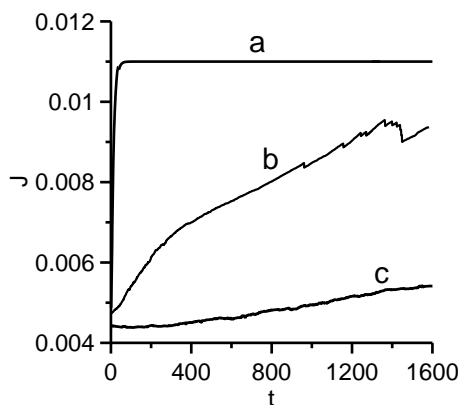


Рис. 5. Графики зависимости потока через канал J от времени для различных значений параметра σ_c : а – 0.1; б – 0.3; в – 0.4

Из рис. 4 видно, что при малых значениях σ_c величина зазора довольно быстро становится равна 1, что свидетельствует о полной очистке канала, при $\sigma_c = 0.3$ наблюдаются колебания величины зазора, свидетельствующие о резком замедлении процесса очистки. Так, здесь вклад вязких напряжений достаточно мал, что приводит к фактической остановке процесса очистки. В случае $\sigma_c = 0.4$ зазор вообще не имеет четкой тенденции ни к росту, ни к уменьшению; происходят хаотические колебания, вызванные тепловыми флуктуациями, очистка канала не происходит.

Еще одной важной характеристикой течения через микроканал является поток жидкости на выходе из канала, который можно определить следующим образом:

$$J = \int_0^H u(x=L, y) dy.$$

Зависимость потока от времени представлена на рис. 5. На всех фрагментах рис. 5 видна тенденция к росту потока, поскольку даже тепловые флуктуации приводят к медленной очистке и выравниванию стенок канала, однако четко видно замедление роста с увеличением σ_c .

Зависимости потока от объемной концентрации осевшей примеси представлены на рис. 6. Видно, что все характеристики имеют четко выраженный линейный участок при малых значениях концентрации, что вполне соответствует закону Дарси (как показано в [10]) для пористой среды или соотношению Бетчелора для микроканалов (см. [10] и [14]).

Рисунки 3–6 демонстрируют замедление и остановку процесса очистки при повышении силы связи частиц со стенкой, что разумно, но возникает вопрос: «а можно ли искусственно ускорить очистку канала?». Самым очевидным ответом выглядит увеличение интенсивности прокачки. В самом деле, с увеличением перепада давления должны увеличиться вязкие напряжения на стенках, что приведет к ускорению очистки. В выбранных безразмерных единицах интенсификация течения в γ раз (увеличение перепада давления $P_1 - P_2$ на входе в трубу в γ раз), может привести только к изменению величины безразмерных параметров, поскольку перепад давления является единицей измерения как давления, так и напряжений. Такое изменение давления приведет к уменьшению безразмерных напряжений σ_T и σ_c во столько же раз. Тогда можно переписать условия (4) в виде

$$\begin{aligned} \sigma|_{y=s_l} &= \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} + \frac{\sigma_T}{\gamma} f_l > \frac{\sigma_c}{\gamma}, \\ \sigma|_{y=s_u} &= -\frac{\partial u}{\partial \bar{n}} + \frac{\sigma_T}{\gamma} f_u > \frac{\sigma_c}{\gamma}. \end{aligned} \quad (6)$$

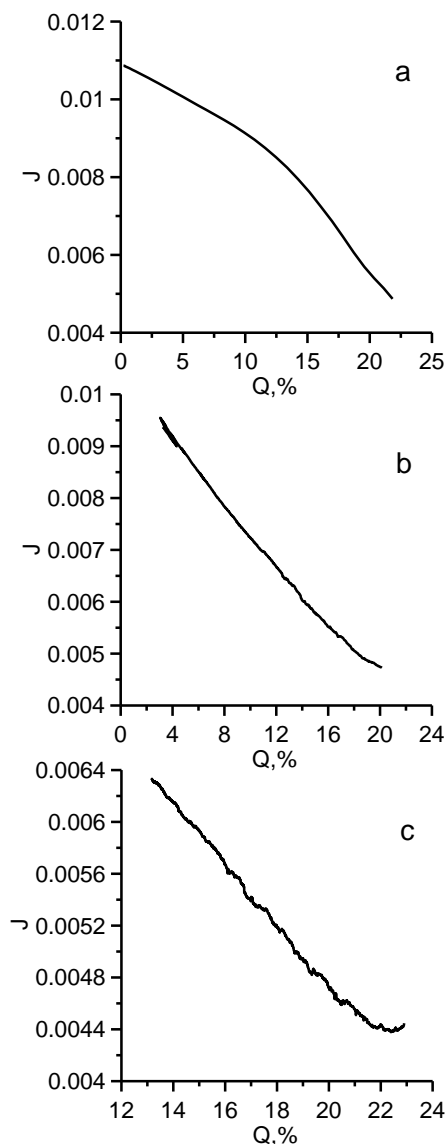


Рис. 6. Графики зависимости потока через канал J от объемной концентрации примеси Q для различных значений параметра σ_c : $a - 0.1$; $b - 0.3$; $c - 0.4$

При этом необходимо учитывать, что число Рейнольдса вырастет в γ раз, а оно должно оставаться малым, т.е. нужно соблюдать условие $\gamma < 10$.

На рис. 7 представлены зависимости объемной концентрации осевшей примеси от времени для различных значений параметра γ . Видно, что интенсификация очистки происходит пороговым образом, когда среднее значение вязких напряжений начинает превышать силу связи, так при $\gamma = 2$ (рис. 7, b) наблюдается достаточно слабое ускорение очистки по сравнению с $\gamma = 1$ (рис. 7, a). Однако при увеличении до $\gamma = 4$ происходит почти трехкратное ускорение процесса.

5. Заключение

Исследован процесс очистки загрязненного канала внешним навязанным потоком в предположе-

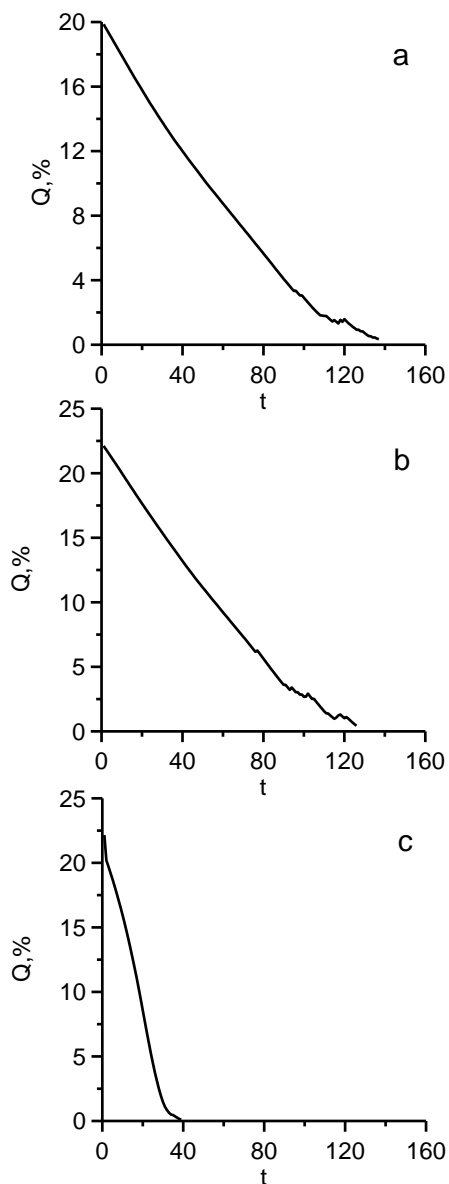


Рис. 7. Графики зависимости объемной концентрации примеси Q от времени при $\sigma_c = 0.2$, $\sigma_T = 0.2$ для различных интенсивностей прокачки γ : $a - 1$ (эффективные значения $\sigma_c = 0.2$, $\sigma_T = 0.2$); $b - 2$ (эффективные значения $\sigma_c = 0.1$, $\sigma_T = 0.1$); $c - 4$ (эффективные значения $\sigma_c = 0.05$, $\sigma_T = 0.05$)

нии ламинарности течения и слабой концентрации взвешенных частиц. Показано, что очень медленная очистка канала происходит при любых условиях прокачки и ее причиной являются случайные тепловые флуктуации, когда частица может случайным образом покинуть свое место на стенке. Однако, когда средняя величина вязких напряжений на стенке становится больше величины связи, процесс очистки может ускориться в десятки, а то и сотни раз. Показано, что при описании процесса остается справедливым предположение о ламинарности течения: с хорошей точностью выполня-

ются закон Дарси для пористой среды или эквивалентное ему соотношение Бетчелора для микроканалов [14].

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-31-00297 мол_а).

Список литературы

1. Flowers B. S., Hartman R. L. Particle handling techniques in microchemical processes // *Challenges*. 2012. Vol. 3. P. 194–211.
2. Gothsch T. et al. Effect of microchannel geometry on high pressure dispersion and emulsification // *Chemical Engineering and Technology*. 2011. Vol. 34. N. 3. P. 335–343.
3. Frey J., Schmitz P., Dufreche P., Pinheiro I. G. Particle deposition in porous media: analysis of hydrodynamic and weak inertial effects // *Transport in Porous Media*. 1999. Vol. 37. P. 25–54.
4. Mays D. C., Hunt J. R. Hydrodynamic aspects of particle clogging in porous media // *Environmental Science and Technology*. 2005. Vol. 39. P. 577–584.
5. Sharp K., Adrian R. On flow-blocking particle structures in microtubes // *Microfluidics and Nanofluidics*. 2005. Vol. 1. P. 376–380.
6. Agbangla G. C., Climent E., Bacchin P. Experimental investigation of pore clogging by microparticles: Evidence for a critical flux density of particle yielding arches and deposits // *Separation and Purification Technology*. 2012. Vol. 101. P. 42–48.
7. Gudipaty T., Stamm M. T., Cheung L. S., Jiang L., Zohar Y. Cluster formation and growth in microchannel flow of dilute particle suspensions // *Microfluidics and Nanofluidics*. 2011. Vol. 10. N. 3. P. 661–669.
8. Kim H., Arastoopour H. Extension of kinetic theory to cohesive particle flow // *Powder Technology*. 2002. Vol. 122. P. 83–94.
9. Marshall J. Particle aggregation and capture by walls in a particulate aerosol channel flow // *Journal of Aerosol Science*. 2007. Vol. 38. P. 333–351.
10. Klimenko L. S., Maryshev B. S. Numerical simulation of microchannel blockage by the random walk method // *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 381, 122644.
11. Agbangla G. C., Climent E., Bacchin P. Numerical investigation of channel blockage by flowing microparticles // *Computers and Fluids*. 2014. Vol. 94. P. 69–83.
12. Shahzad K., DAVino G., Greco F., Guido S., Maffettone P. L. Numerical investigation of hard-gel microparticle suspension dynamics in microfluidic

channels: aggregation/fragmentation phenomena, and incipient clogging // *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 303. P. 202–216.

13. Elimelech M., Gregory J., Jia X. Particle deposition and aggregation: measurement, modelling and simulation. Oxford: Butterworth–Heinemann, 2013. 458 p.
14. Batchelor G. K. Sedimentation in a dilute dispersion of spheres // *Journal of Fluid Mechanics*. 1972. Vol. 52. N. 2. P. 245–268.

References

1. Flowers B. S., Hartman R. L. Particle handling techniques in microchemical processes. *Challenges*, 2012, vol. 3, pp. 194–211.
2. Gothsch T. et al. Effect of microchannel geometry on high pressure dispersion and emulsification. *Chemical Engineering and Technology*, 2011, vol. 34, no. 3, pp. 335–343.
3. Frey J., Schmitz P., Dufreche P., Pinheiro I. G. Particle deposition in porous media: analysis of hydrodynamic and weak inertial effects. *Transport in Porous Media*, 1999, vol. 37, pp. 25–54.
4. Mays D. C., Hunt J. R. Hydrodynamic aspects of particle clogging in porous media. *Environmental Science and Technology*, 2005, vol. 39, pp. 577–584.
5. Sharp K., Adrian R. On flow-blocking particle structures in microtubes. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2005, vol.1, pp. 376–380.
6. Agbangla G. C., Climent E., Bacchin P. Experimental investigation of pore clogging by microparticles: Evidence for a critical flux density of particle yielding arches and deposits. *Separation and Purification Technology*, 2012, vol. 101, pp. 42–48.
7. Gudipaty T., Stamm M. T., Cheung L. S., Jiang L., Zohar Y. Cluster formation and growth in microchannel flow of dilute particle suspensions. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2011, vol. 10, no. 3, pp. 661–669.
8. Kim H., Arastoopour H. Extension of kinetic theory to cohesive particle flow. *Powder Technology*, 2002, vol. 122, pp. 83–94.
9. Marshall J. Particle aggregation and capture by walls in a particulate aerosol channel flow. *Journal of Aerosol Science*, 2007, vol. 38, pp. 333–351.
10. Klimenko L. S., Maryshev B. S. Numerical simulation of microchannel blockage by the random walk method. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 381, pp. 122644.
11. Agbangla G. C., Climent E., Bacchin P. Numerical investigation of channel blockage by flowing microparticles. *Computers and Fluids*, 2014, vol. 94, pp. 69–83.
12. Shahzad K., DAVino G., Greco F., Guido S., Maffettone P. L. Numerical investigation of hard-gel microparticle suspension dynamics in microfluidic

- channels: aggregation/fragmentation phenomena, and incipient clogging. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 303, pp. 202–216.
13. Elimelech M., Gregory J., Jia X. *Particle deposition and aggregation: measurement, modelling and simulation*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 458 p.
14. Batchelor G. K. Sedimentation in a dilute dispersion of spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, vol. 52, no. 2, pp. 245-268.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Клименко Л. С., Марышев Б. С. Очистка микроканала внешним ламинарным потоком // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. Вып. 3. С. 5–13. doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-05-13

Please cite this article in English as:

Klimenko L. S. Maryshev B. S. Microchannel cleaning by the external laminar flow. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2020. Vol. 3. pp. 5–13. doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-05-13