

ФИЛЬТРАЦИЯ СМЕСИ ЧЕРЕЗ МАССИВ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ЗАКУПОРИВАНИЯ

Н. П. Пьянников^a, Б. С. Марьшев^{a,b}

^aПермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

^bИнститут механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Пермь, Королева, 1

Рассматривается фильтрация смеси в горизонтальном канале пористой среды. На боковых стенках канала задается перепад давления, определяющий фильтрационный поток. Так же учтено, что перенос любой нерастворимой примеси в пористой среде сопровождается процессом ее осаждения на стенки пор - иммобилизацией. Иммобилизация замедляет перенос, изымая часть примеси из потока. Осажденная примесь занимает часть объема пор, тем самым уменьшая пористость и проницаемость среды, в результате приводя к ее закупорке. Исследовано распространение плоского диффузионного фронта, показано, что при слабой иммобилизационной активности примеси среда не закупоривается и достаточно быстро устанавливается равномерное распределение примеси в канале. При увеличении влияния иммобилизации наблюдается явление полного закупоривания и накопления примеси. Так же получены оценки времен закупоривания фильтра для различных значений параметров задачи.

Ключевые слова: транспорт в пористой среде; закупорка; фильтрация

THE MIXTURE FILTRATION THROUGH THE POROUS MEDIA WITH CLOGGING

N. P. Pyannikov^a, B. S. Maryshev^{a,b}

^aPerm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

^bInstitute of Continuous Media Mechanics, Korolyov St. 1, 614013, Perm

The paper is devoted to the consideration of filtration of a mixture in a horizontal channel of a porous medium. On the side walls of the channel, a pressure drop is defined, which determines the filtration flow. It is also taken into account that the transfer of any insoluble impurity in a porous medium is accompanied by the process of its deposition onto the walls by pore – the solute immobilization. Immobilization slows down the transfer, removing a portion of the solute from the stream. The adsorbed solute takes up part of the pore volume, thereby the porosity and permeability of the medium is reduced. As result some pores becomes blocked. The propagation of a plane diffusion front has been studied. It is shown that for a weak immobilization activity of an impurity the medium is not clogged. The uniform distribution of the concentration into the channel is formed quickly. When the effect of immobilization is great, the phenomenon of complete blockage of media and accumulation of solutes is observed. We also estimate the times of filter clogging for different values of the problem parameters.

Keywords: transport in porous media; clogging; filtration

Введение

Работа посвящена исследованию влияния закупорки горизонтальное напорное фильтрационное течение в канале пористой среды. Если на боко-

вых границах канала задан перепад давления, то в соответствии с законом Дарси [1] возникает горизонтальный фильтрационный поток. В рассматриваемой задаче происходит фильтрация смеси состоящей примеси и несущей жидкости, насыщающей пористую среду. Другими словами описывается распространение плоского диффузионного фронта в горизонтальном направлении.

Чаще всего в качестве модели диффузии при описании переноса примеси в пористой среде, используется стандартная модель диффузии-адвекции основанная на законе Фика [2]. Однако, массоперенос в пористой среде не всегда корректно описывается классической моделью, поскольку часть жидкости связана, а частицы примеси, находящиеся в связанной жидкости или прилипшие к твердому скелету, неподвижны. Они не переносятся вовсе (находятся в немобильной фазе), что подтверждается экспериментами [3, 4]. Наличие такой примеси приводит к замедлению диффузии и, как следствие, к существенному изменению течения и характеристик переноса.

Обычно перенос примеси через пористую среду с учетом неподвижности части примеси описывается с помощью МИМ подхода (Mobile-Immobile media) [5, 6].

При переносе оседающая внутри поры примесь уменьшает объем поры. В этом случае пористость линейно зависит от объемной концентрации примеси находящейся в немобильной фазе. При этом гидродинамическое сопротивление потоку через пору увеличивается. Таким образом, осаждение примеси сказывается и на проницаемости среды. Обычно зависимость проницаемости от пористости среды описывается законом Козени-Кармана [7] полученным из геометрических соображений

В данной работе изучается влияние закупорки на перенос примеси через горизонтальный канал пористой среды. На боковых границах канала задается перепад давления. Верхняя и нижняя границы канала считаются непроницаемыми. В качестве закона движения жидкости использована модель Дарси [1]. Учет иммобилизации производится в рамках МИМ модели с кинетикой второго порядка [6], зависимость проницаемости от пористости учитывается формулой Козени-Кармана [7].

Постановка задачи

Рассматривается задача о горизонтальной напорной фильтрации смеси через канал пористой среды. Длина канала L . На боковых стенках канала заданы постоянные значения давления P_1 и P_2 . Концентрация примеси в поступающей смеси предполагается постоянной и равной C_0 . Верхняя и нижняя границы канала непроницаемы для жидкости и примеси. Пористость и проницаемость чистой среды равны соответственно κ_0 и φ_0 . Конфигурация задачи представлена на рис. 1.

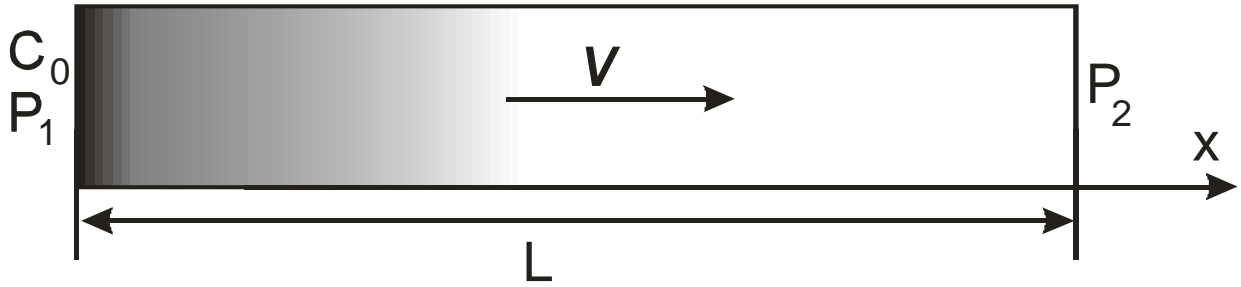


Рис.1. Конфигурация задачи

Уравнения переноса примеси с учетом иммобилизации и закупорки могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \phi_0 \frac{\partial}{\partial t} (c_m + c_{im}) &= -V \nabla c_m + \phi_0 D \Delta (c_m), \\
 \frac{\partial}{\partial t} c_{im} &= \alpha (c_m (Q_0 - c_{im}) - K_d c_{im}), \\
 \frac{\eta}{\kappa(\phi)} V &= -\nabla P, \quad \text{div} V = 0, \\
 \kappa(\phi) &= \kappa_0 \phi^3 / (1 - \phi)^2, \quad \phi = \phi_0 - c_{im}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь $\kappa(\phi)$ – проницаемость пористой среды, η – коэффициент динамической вязкости жидкости, P – давление, c_m, c_{im} – объемные концентрации примеси, находящейся в мобильной и немобильной фазах соответственно, V – скорость фильтрации, D – эффективный коэффициент диффузии, ϕ – пористость среды, α, K_d – коэффициенты переноса и распределения примеси, Q_0 – концентрация насыщения пористой среды.

Обезразмерим уравнения (1), для этого выберем следующие масштабы длины, времени давления

$$[L] = L, [t] = \frac{L^2}{D}, [V] = \frac{D}{L}, [P] = P_1 - P_2, [c_m, c_{im}] = C_0.
 \tag{2}$$

В этом случае безразмерная форма уравнений (1) может быть записана в виде:

$$\begin{aligned}
 \partial_t (c_m + c_{im}) &= -V \cdot \nabla c_m + \Delta c_m, \\
 \partial_t c_{im} &= a c_m (Q - c_{im}) - b c_{im}, \\
 V &= -\kappa(\phi) P e, \quad \phi = \phi_0 - c_{im}, \\
 \kappa(\phi) &= \phi^3 / (1 / C_0 - \phi)^2.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Уравнения (3) содержат пять безразмерных параметров: $a = \alpha C_0 L^2 / D$, $b = \alpha K_d L^2 / D$ – безразмерные коэффициенты адсорбции и десорбции соответственно, $Pe = \kappa_0 (P_1 - P_2) / \eta D$ – число Пекле, C_0 – концентрация примеси в прокачиваемой смеси и ϕ_0 – пористость незагрязненной среды. Здесь учтено, что давление распределено линейно по закону $P = (L - x) / L$. Граничные условия для системы (3) могут быть записаны в виде:

$$c_m|_{x=0} = C_0, \quad \partial_x c_m|_{x=L} = 0, \quad (4)$$

Задача (3) с граничными условиями (4) решается численно, методом конечных разностей второго κ_0 порядка точности по координате и первого порядка точности по времени [8]. Результаты решения задачи представлены ниже.

Результаты

При решении задачи исследовался режим распространения примеси в канале. В зависимости от соотношения параметров задачи наблюдалось свободное распространение примеси, без закупорки канала, или же канал закупоривался. Так, на рис. 2 показано распределение концентраций примеси находящейся в мобильной и немобильной фазах внутри в некоторый момент времени. Соотношение параметров выбрано таким образом, что закупорки не наблюдается и примесь свободно распространяется, в результате мы видим равномерное поле концентрации. Это происходит из-за того, что значение максимальной концентрации насыщения (Q) существенно меньше пористости (ϕ_0).

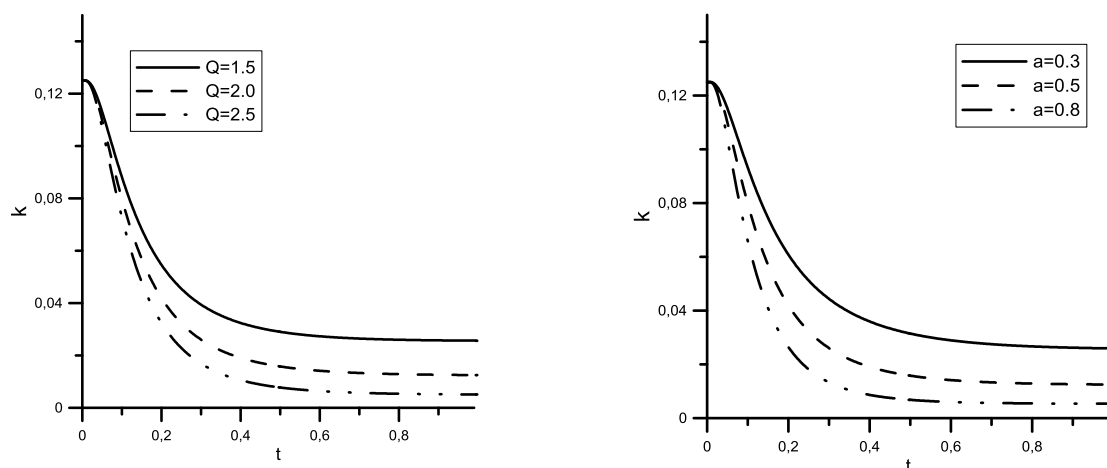


Рис. 2. Зависимость проницаемости от времени на левом конце канала ($x = 1$) при различных значениях концентрации насыщения среды. Расчет был произведен для следующих значений параметров: $b = 0.5$, $\phi_0 = 2$, $a = 0.5$ (слева), $Q = 2$ (справа), соответствующие значения параметров Q и a указаны в легенде

На рис. 2 показана зависимость проницаемости среды на левом конце канала от времени при различных значениях концентрации насыщения пори-

стой среды (Q , рис.2 (слева)) и параметра адсорбции (a , рис. 2 (справа)). Значение пористости во всех случаях одинаково ($\varphi_0 = 2$). Видно, что в случае $Q > \varphi_0$ происходит закупорка (проницаемость падает более чем в 6 раз). В противоположном случае проницаемость так же может значительно уменьшаться, однако, закупорки не происходит. При изменении параметра a , при больших коэффициентах адсорбции закупорка происходит не только сильнее, но и сам переходный процесс занимает меньше времени.

На рис. 3 демонстрируется зависимость времени закупорки (времени, за которое проницаемость на правом конце падает в 10 раз) от концентрации насыщения пористой среды и коэффициента адсорбции.

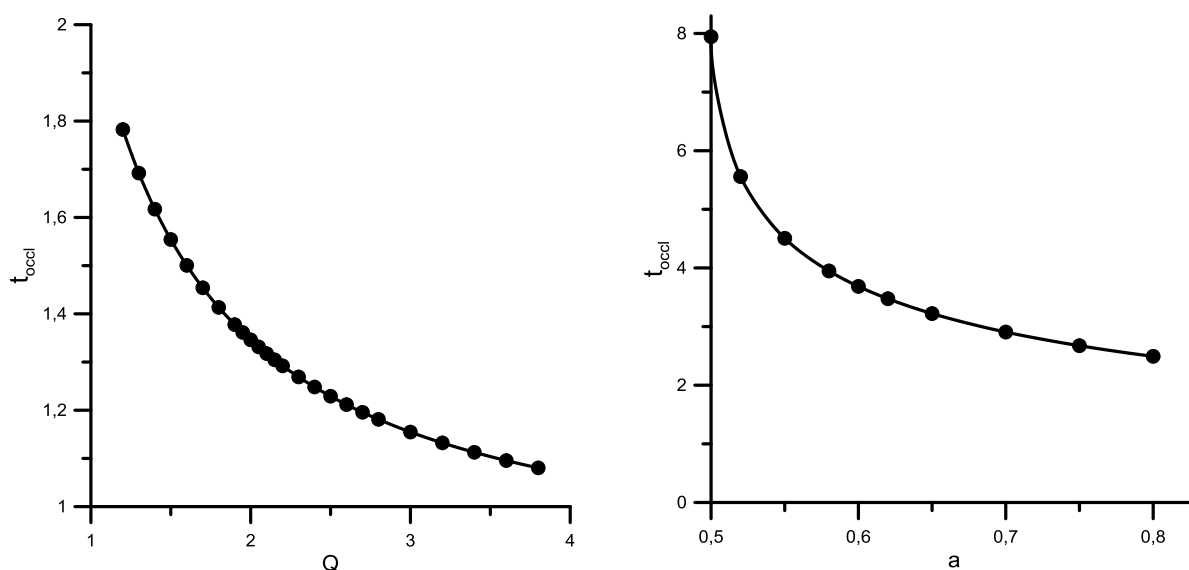


Рис. 3. Зависимость времени закупорки от концентрации насыщения среды. Расчет был произведен для следующих значений параметров $b = 0.5$, $\varphi_0 = 1.5$, $Q = 1.5$ (слева), $a = 0.5$ (справа)

Заключение

В ходе решения поставленной задачи были получены уравнения описывающие распространение диффузионного фронта примеси в пористой среде с учетом закупорки. Была составлена конечно-разностная схема и получены распределения концентраций адсорбированной и мобильной компонент примеси внутри канала в зависимости от времени, а так же, исследованы зависимости проницаемости от времени на правом конце канала для различных случаев.

Показано, что при некоторых значениях параметров происходит закупорка, тогда как при других фильтр сохраняет относительно высокую проницаемость. Установлена зависимость времени закупорки от концентрации насыщения пористой среды и коэффициентов адсорбции и десорбции.

Список литературы

1. *Darcy H. P.* Les fontaines publiques de la Ville de Dijon. Paris: Dalmont, 1856. 657 p.
2. *Nield D. A., Bejan A.* Convection in Porous Media. New York: Springer, 2006. 654 p.
3. *Latrille C., Cartalade A.* New experimental device to study transport in unsaturated porous media / In.: Birkle P., Torres I. S. (Eds.) Water–rock interaction. Leiden: CRC Press, 2010. P. 299–302.
4. *Agaoglu B., Scheytt T., Coptu N. K.* Laboratory–scale experiments and numerical modeling of cosolvent flushing of multi-component NAPLs in saturated porous media // Journal of Contaminant Hydrology. 2012. Vol. 140. P. 80–94.
5. *Van Genuchten M. Th., Wierenga P. J.* Mass transfer studies in sorbing porous media I. analytical solutions // Soil Science Society of America Journal. 1976. Vol. 40. P. 473–480.
6. *Selim H. M., Amacher M. C.* Reactivity and Transport of Heavy Metals in Soils. Boca Raton: CRC, 1997. 240 p.
7. *Kozeny J.* Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden // Sitzungsbericht Akademie der Wissenschaften Wien. Vol. 136. P. 271–306.
8. *Калиткин Н. Н.* Численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 592 с.