

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-2-3

**МНОГОКРАТНАЯ ПРОПИТКА ПОРИСТОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ:  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ****Н. Н. Смирнов<sup>1,2</sup>, В. Ф. Никитин<sup>1,2</sup>, Е. И. Скрылева<sup>1,2</sup>, Ю. Г. Вайсман<sup>1</sup>**<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*<sup>2</sup> *Федеральный научный центр «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация  
jennynne@yandex.ru*

*Аннотация:* в работе рассматривается процесс многократной пропитки пористой среды за счет капиллярных сил в условиях микрогравитации. Подобные исследования имеют большое значение как для космических технологий, так и для земных приложений. Например, на космической станции течение жидкости за счет капиллярных эффектов можно наблюдать в тепловых трубках, очистных системах, в гидропонных системах для выращивания растений. В условиях земной гравитации капиллярные эффекты могут также оказывать существенное влияние на фильтрационные течения, например при добыче углеводородов, когда происходит одновременное течение нескольких флюидов сквозь пористую среду.

Наблюдение капиллярных эффектов при обычной гравитации затруднено, так как действие силы тяжести преобладает над капиллярными силами, маскируя некоторые важные аспекты. В данной работе рассматриваются эксперименты по течению жидкости сквозь высокопроницаемую пористую среду во время параболических полетов. Результаты экспериментов показали, что с каждой последующей параболой жидкость поднимается выше, т.е. наблюдается более интенсивная пропитка в уже смоченной среде. Для моделирования таких процессов требуются специальные математические модели, учитывающие гистерезис. В статье описаны такие модели и представлены результаты численного моделирования на их основе. Приведено сравнение экспериментальных данных и результатов численного моделирования фильтрационных потоков жидкости, показана возможность определения неизвестных эмпирических констант на экспериментальной базе.

*Ключевые слова:* капиллярные эффекты, микрогравитация, фильтрация, гистерезис.

*Благодарности:* работа выполнена за счет субсидии, выделенной МГУ им. М.В. Ломоносова на выполнение государственного задания по теме «Динамика взаимодействия жидких, твердых и газообразных сред».

*Для цитирования:* Смирнов Н. Н., Никитин В. Ф., Скрылева Е. И., Вайсман Ю. Г. Многократная пропитка пористой среды в условиях микрогравитации: экспериментальные исследования и математическое моделирование. *Успехи кибернетики*. 2022;3(2):24–30. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-2-3.

**MULTIPLE IMBIBITION OF A POROUS MEDIUM IN MICROGRAVITY: EXPERIMENTS  
AND SIMULATION****N. N. Smirnov<sup>1,2</sup>, V. F. Nikitin<sup>1,2</sup>, E. I. Skryleva<sup>1,2</sup>, Yu. G. Weisman<sup>1</sup>**<sup>1</sup> *Moscow State University, Moscow, Russian Federation*<sup>2</sup> *Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation  
jennynne@yandex.ru*

*Abstract:* the paper considers multiple successive imbibitions of a porous medium due to capillary forces in microgravity. Such studies are of great importance both for space and Earth technologies. For example, on space stations liquid flows due to capillary effects can be observed in heat pipes, purification systems, and hydroponic plant growing systems growing plants. Under the Earth’s gravity, capillary phenomena significantly affect seepage flows (e.g., in hydrocarbon production) when several fluids flow simultaneously through a porous medium.

Observing capillary effects under normal gravity is difficult because gravity dominates over capillary forces, masking some key aspects. This paper discusses experimental studies of liquid flows through a highly

permeable porous medium during parabolic flights. The results show that with each subsequent parabola arc, the liquid rises higher, i.e. there is more intensive imbibition in the already wetted medium. To simulate such processes, special models are required to consider hysteresis. The paper covers such models and presents the simulation results. The experimental data and simulation of seepage fluid flows are compared. Unknown empirical constants can be estimated experimentally.

*Keywords:* capillary effects, microgravity, seepage, hysteresis.

*Acknowledgements:* this work is supported by Moscow State University subsidy for the Dynamics of Interaction between Liquid, Solid, And Gaseous Media government contract.

*Cite this article:* Smirnov N. N., Nikitin V. F., Skryleva E. I., Weisman Yu. G. Multiple Imbibition of a Porous Medium in Microgravity: Experiments and Simulation. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(2):24–30. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-2-3.

## Введение

Исследование процесса фильтрации под действием капиллярных сил в условиях микрогравитации представляет большой интерес для земных и космических технологий. Например, на космических аппаратах капиллярное движение жидкостей наблюдается в различных устройствах и процессах, таких как системы очистки, тепловые трубки (рис. 1) или подкачка топлива в условиях невесомости.

Капиллярные силы играют главную роль при выращивании растений гидропонным способом (рис. 2), то есть в искусственных средах без почвы. Движение жидкостей, происходящее внутри живых организмов в условиях малой гравитации, отличается от того, что происходит в земных условиях. Знания об этих процессах могут найти применение в космической биомедицине.



**Рис. 1.** Терморегуляция на космическом корабле: движение жидкости в тепловых трубках под действием капиллярных сил



**Рис. 2.** Выращивание растений в условиях микрогравитации: распределение воды или питательного раствора в корневой зоне

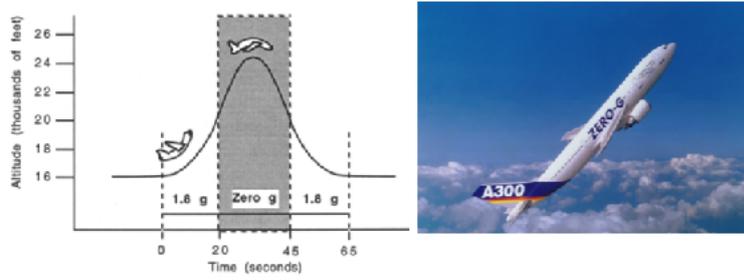
Изучение капиллярных эффектов в земных условиях [1–4] затруднено: в стандартных пористых средах течения трудно визуализировать, а в средах с крупными порами капиллярная пропитка невозможна из-за преобладающего влияния силы тяжести. В данной работе рассматриваются течения в высокопроницаемых пористых средах в условиях микрогравитации, которые достигаются посредством параболических полетов (рис. 3).

Также в работе описывается новый способ обработки экспериментальных данных, приводятся результаты такой обработки. Представлены результаты вычислительного моделирования многократной пропитки пористой среды в условиях микрогравитации. Моделирование процесса происходит с использованием некоторых эмпирических констант, значения которых подбираются на основе экспериментальных данных.

Рассматривается течение двух несжимаемых жидкостей в неподвижном пористом скелете, фазовые переходы отсутствуют. Тепловые и инерционные эффекты не учитываются. Значение и направление гравитации меняется с течением времени. Учитывается гистерезис относительных проницаемостей и капиллярного давления. Задача представляет собой вытеснение одной жидкости другой за счет капиллярных эффектов.

## Математическая модель

Подробно вопросы математического и численного моделирования процесса многократной пропитки пористой среды в условиях микрогравитации описаны в [6, 7].



**Рис. 3.** Параболические полеты

Уравнения баланса массы фаз запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi \rho_k s_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_k u_{k,j}) = 0. \quad (1)$$

Средняя по объему скорость фильтрации определяется как

$$u_j = \sum_k u_{k,j}.$$

Считаем, что пористость среды не зависит от времени. Плотности жидкостей полагаем постоянными, тогда после суммирования уравнений (1) получим:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0.$$

Запишем уравнения баланса импульса в форме закона Дарси:

$$v_{kj} = -K_A \frac{K_k^R(s_1, s_2)}{\mu_k} \left( \frac{\partial p_k}{\partial x_j} + \rho_k g_j \right),$$

где  $v_{kj} = u_{k,i} / \varphi s_k$ .

Давление между фазами определяется капиллярным давлением, зависящим только от насыщенности:

$$p_1^c(s_1) = p_2 - p_1.$$

Будем моделировать капиллярное давление по модели Леверетта:

$$p_c = \frac{\sigma \cos \theta}{\sqrt{K_A / \phi}} J(S), \quad J(S) = C_0 + C_W S^{-n_1} - C_N (1-S)^{-n_2}.$$

Относительные проницаемости моделируются согласно модели Кори, которая в общем случае выглядит так:

$$K_1^R = a_1 S^{n_1}, \quad K_2^R = a_2 (1-S)^{n_2}, \quad S = \frac{s - s_1^R}{1 - (s_1^R + s_2^R)}.$$

Без гистерезиса дренажа и пропитки здесь везде константы, с гистерезисом переменными являются остаточные насыщенности и значения  $a_k$ .

Пусть изначально образец сухой, заполнен несмачивающей второй фазой. Тогда начальное состояние  $s_1^R = 0$ . При этом:

$$s_2^R = \frac{1}{1 + C_2} = \text{const}.$$

При этом  $a_1 = k_1^R$ ,  $a_2 = 1$ . Эти постоянные сохраняются до тех пор, пока идет пропитка, то есть пока выполняется условие  $\partial s / \partial t \geq 0$ .

Пусть в некоторый момент знак производной насыщенности сменился:  $\partial s/\partial t < 0$ . Значение  $s_1^R$ , которое сохраняется за все время дренажа, будет равно

$$s_1^R = \frac{s_1^{\max}}{1 + C_1 s_1^{\max}}.$$

Здесь  $s_1^{\max}$  — максимальное значение насыщенности первой фазы, достигнутое во время пропитки. Постоянные  $C_1, C_2$  задаются изначально, они называются постоянными Лэнда, а эта модель гистерезиса — моделью Лэнда. Также изменятся постоянные  $a_1 = 1, a_2 = k_2^R$ , эта смена отражает характер относительных проницаемостей при дренаже и пропитке.

Если знак производной насыщенности опять сменился и снова начнется пропитка, величина  $s_1^R$  останется прежней, поменяются только  $a_1$  и  $a_2$ .

Задача одномерная, все переменные заданы на отрезке  $x \in [0, L]$ . В начальном состоянии столб пористой среды пропитан до высоты  $x_{ini}$ :

$$s_1 = \begin{cases} 0, & x \geq x_{ini}, \\ 1, & x < x_{ini}. \end{cases}$$

Граничные условия таковы:

$x = 0$ :  $p = p_\infty$  — начальное гидростатическое давление,

$x = L$ :  $p = p_0$  — атмосферное давление.

### Экспериментальные исследования

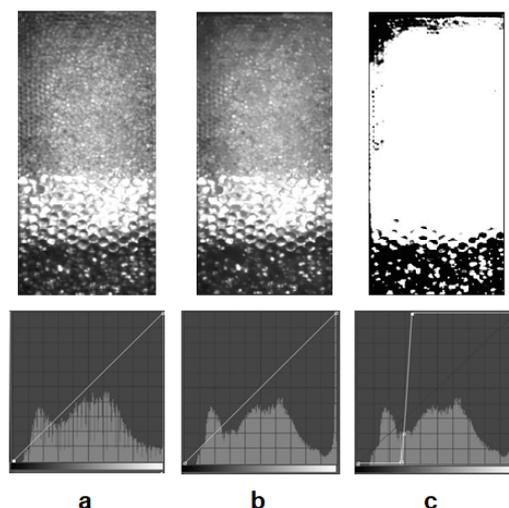
Экспериментальная ячейка [8] представляет собой полый алюминиевый параллелепипед. Две противоположные стороны ячейки оборудованы стеклянными окошками, предназначенными для наблюдения за капиллярной пропиткой (рис. 4). Пористая среда моделируется насыпкой стеклянных шариков.



Рис. 4. Экспериментальная ячейка

Такая среда обладает рядом преимуществ. Правильная форма шариков позволяет пренебречь возможной анизотропностью среды, упрощая исследование течения жидкости, а прозрачность среды предоставляет возможность легко визуализировать инерционное течение. Снизу к ячейке с помощью небольшого канала подсоединен резервуар, из которого жидкость поступает в ячейку. В течение всего эксперимента ведется видеозапись капиллярной пропитки пористой среды. Впоследствии она разбивается на последовательность изображений. Изначально течение жидкости изучалось по исходным изображениям, но было затруднено из-за недостаточной контрастности фотографий. Опишем метод обработки снимков для облегчения исследования движения фронта жидкости. Каждому изображению соответствует гистограмма, она показывает количество пикселей того или иного оттенка серого. Условно снимок можно разбить на две зоны: более светлую, которая соответствует еще не пропитанной пористой среде, и более темную, показывающую движение жидкости. На гистограмме это отражено в виде двух пиков (рис. 5).

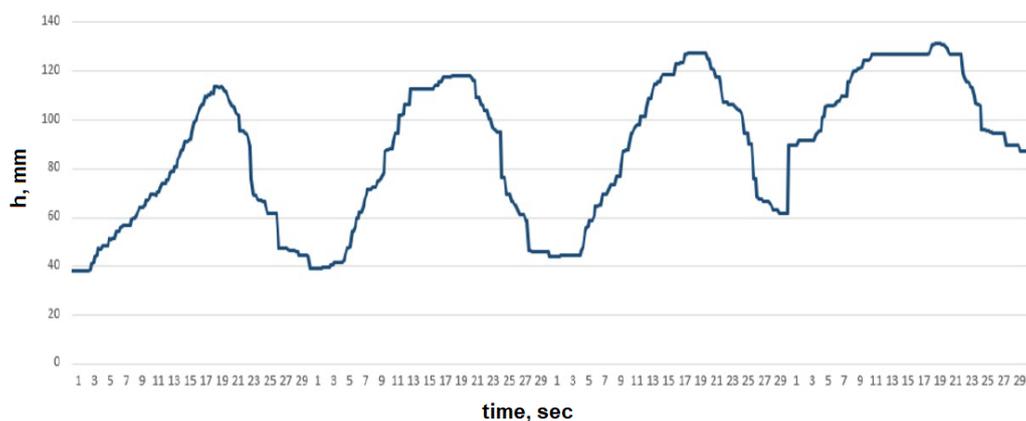
Гистограмма обычно сильно «зубчатая», чтобы ее сгладить, накладывался размывающий фильтр.



**Рис. 5.** *Обработка экспериментальных данных*

Далее изменялась кривая уровней так, чтобы она проходила через локальный минимум между этими двумя пиками. Более крутые части кривой представляют собой области высокого контраста, а плоские части кривой — области низкого контраста. Существует некоторая погрешность, поэтому на изображении могут оставаться пиксели темно-серых или почти белых оттенков, но их наличие несущественно. Такой способ обработки значительно упрощает исследование движения фронта жидкости. На основе обработанных изображений были построены графики движения фронта жидкости.

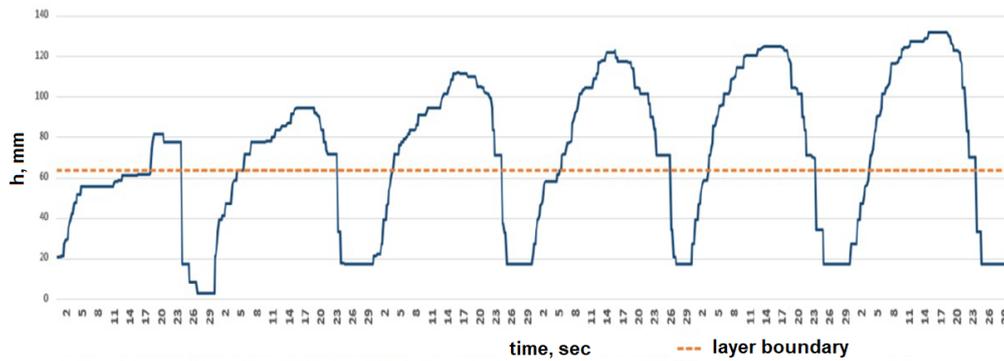
На первом графике (рис. 6) изображены пять последовательных парабол, в течение которых жидкость то поднималась, то опускалась. Фильтрация происходила в однородной среде, диаметр шариков — 2 мм. Можно заметить, что при повторной пропитке жидкость с каждым разом поднималась все выше и выше, то есть по уже смоченной пористой среде жидкость поднимается интенсивнее.



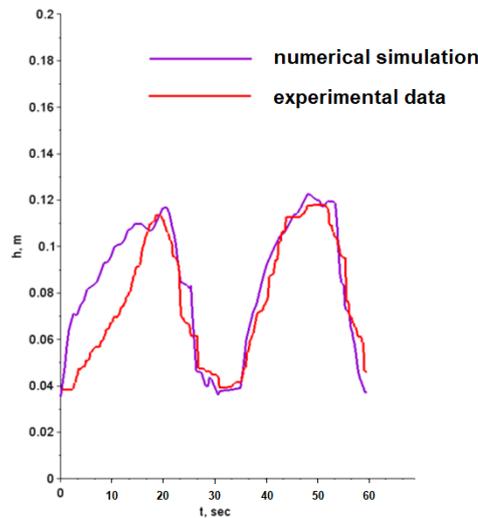
**Рис. 6.** *Многokратная пропитка однородной пористой среды*

Второй график (рис. 7) соответствует капиллярной пропитке неоднородной среды, представленной на рисунке 5. Диаметр крупных шариков — 6 мм, мелких — 2 мм. Видно, что в менее проницаемой среде капиллярные эффекты сильнее, но больше сопротивление, поэтому на небольшом участке графика наблюдается резкое ускорение фронта, но затем он резко замедляется.

На рис. 8 представлено сравнение численного расчета, основанного на математической модели, описанной выше, и экспериментальных данных. Расчет согласуется с экспериментом: как в эксперименте, так и в расчетах жидкость при повторной пропитке поднимается выше.



**Рис. 7.** Многократная пропитка неоднородной пористой среды



**Рис. 8.** Сравнение результата численного моделирования и экспериментальных данных

В расчете использовались следующие константы:

$$C_1 = 25, \quad C_2 = 9.3, \quad k_1^R = k_2^R = 0.015, \\ a_W = a_N = 0.5, \quad C_0 = 0.02, \quad C_W = 0.015, \quad C_N = 0.009.$$

### Заключение

В случае многократной пропитки пористой среды просачивание происходит интенсивнее сквозь уже смоченную среду. Рассмотрена математическая модель с учетом гистерезиса, когда режим пропитки несколько раз сменяется режимом дренажа. На основе предложенной модели проводится численное моделирование процесса многократной пропитки пористой среды. На экспериментальном базисе были выбраны эмпирические константы в математической модели. Показано, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Barenblatt G. I., Entov V. M., Ryzhik V. M. *Theory of Fluids Flows through Natural Rocks*. Springer Netherlands; 1990.
2. Bear J., Bachmat Y. *Introduction to Modelling of Transport Phenomena in Porous Media*. Kluwer Academic Publishers-Dordrecht, Boston, London, 1990.
3. Kaviany M. *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. Second Ed. Springer-Verlag, New York, 1995.
4. Nield D. A., Bejan A. *Convection in Porous Media*. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, London, 1992.

5. Smirnov N. N., Dushin V. R., Nikitin V. F., Phylippov Yu. G., Nerchenko V. A. Three-Dimensional Convection and Unstable Displacement of Viscous Fluids from Strongly Encumbered Space. *Acta Astronautica*. 2010;66:844–863.
6. Dushin V. R., Smirnov N. N., Nikitin V. F., Skryleva E. I., Weisman Y. G. Multiple Capillary-Driven Imbibition of a Porous Medium under Microgravity Conditions: Experimental Investigation and Mathematical Modeling. *Acta Astronautica*. 2022;193:572–578. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.06.054.
7. Kolenkina E. I., Nikitin V. F., Dushin V. R., Smirnov N. N., Shamina A. A., Weisman Yu. G. Microgravity Investigation of Capillary-Driven Imbibition into an Inhomogeneous Porous Medium. *Proceedings of 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, 12–14 October 2020*. IAC-20,A2,2,3,x57771.
8. Istasse E. Determination of Capillary Characteristics in Porous Media. Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences Appliquées, Mémoire présenté par Eric Istasse en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences Appliquées, Directeur: Prof. J.C. Legros., Année Académique 2000-2001, Brussels 2001.