

УДК 532.546:532.68

**ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ПОРОВЫХ ФЛЮИДОВ  
В ОБРАЗЦАХ ТЕХНОГЕННОГО ВЕЩЕСТВА ХВОСТОХРАНИЛИЩ**

**Д. О. Кучер, Т. В. Корнеева, С. Б. Бортникова**

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
E-mail: korneevatv@ipgg.sbras.ru, просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Проведено лабораторное моделирование процессов фильтрации поровых флюидов в образцах техногенного вещества хвостохранилищ. Представлены данные по двум лабораторным методам: весовому и кажущегося сопротивления. Выявлено, что капиллярные силы вносят основной вклад в распространение растворов от источника загрязнения. Это позволило оценить характер и скорость процесса. Результаты экспериментов показали большую скорость пропитки твердого вещества хвостохранилищ в вертикальном и латеральном направлениях от источников дренажных растворов, что пагубно складывается на экологии близлежащих территорий и водоемов.

*Техногенное вещество, проницаемость, пористость, метод электротомографии, капиллярная пропитка, скорость фильтрации*

DOI: 10.15372/FTPRPI20190504

Проблема распространения техногенных растворов и их взаимодействия с природными компонентами окружающей среды широко обсуждается в отечественной и мировой научной литературе. Исследуются различные параметры грунтов и дамб хвостохранилищ [1]. Отражен опыт комплексной оценки состояния окружающей среды в районах с высокой техногенной нагрузкой на базе данных дистанционного зондирования Земли, а также показаны основные подходы к обработке космоснимков и последовательность анализа природных компонентов [2]. Техногенные отвалы — важный резерв получения дополнительных объемов минерального сырья, но также и источник загрязнения окружающей среды в районе своего расположения, который необходимо ликвидировать [3].

Гидрогенные потоки рассеяния химических элементов в окружающей среде могут формироваться в том случае, если в пределах техногенно-минеральных объектов присутствуют техногенные воды. Они возникают как естественным путем в результате просачивания атмосферных вод, так и искусственным, например при гидротранспортировании хвостов технической водой. Загрязняющие вещества в техногенных водах находятся в составе взвесей и представляют наибольший интерес для изучения в растворенной форме.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 19-17-00134) и в рамках базовых проектов ФНИ (№ 0331-2019-0031) и (№ 0266-2019-0008).

Объекты исследования отличаются высоким содержанием широкого спектра химических элементов (Cu, Zn, Cd, Fe, Mn, Cr, Co и др.) в твердом веществе, в том числе первого класса опасности (As, Hg, Be), что позволяет судить об экологических рисках. Каждое хранилище — сложившаяся в течение 30–50 лет техногенная система, стремящаяся к равновесию с окружающей средой и являющаяся источником водной и воздушной миграции вещества. Выбраны заброшенные хранилища отходов горнорудного производства, находящиеся в Кемеровской области и доступные для наблюдений:

- отходы флотации руд Белоключевского медно-колчеданного месторождения (п. Урск) в Кемеровской области с 1950-х гг. Прodуцируют кислые стоки с высокой минерализацией, содержат повышенные концентрации сульфидных минералов и барита, лишены растительности [4, 5];

- отходы цианирования золото-арсенопирит-кварцевых руд Комсомольского золоторудного месторождения (Комсомольский гидроотвал, Кемеровская область, работал в 1970–1990 гг.). Кислотопродуцирующий потенциал этих отходов сбалансирован высокими содержаниями карбонатных минералов. Высокоминерализованные сточные воды имеют нейтральную рН среду, однако содержат повышенные концентрации мышьяка [6, 7].

Скорость образования техногенных вод из пористых горнорудных отходов в значительной степени зависит от диффузионного потока кислорода, который уменьшается с увеличением количества воды [8]. Предложено несколько способов предотвращения образования кислых сточных вод, которые базируются на увеличении объема воды в горнорудных отходах. Два распространенных подхода обусловлены затоплением отходов (для хвостохранилищ в низменных районах) и применением различных покрывных материалов, в том числе с капиллярными барьерными эффектами, основанными на удержании воды между мелкозернистыми и крупнозернистыми пористыми материалами. В условиях влажного климата мелкозернистый слой помещается между двумя более крупнозернистыми слоями. Затем под воздействием отрицательного давления (в ненасыщенных условиях) грубые слои быстро стекают до уровня остаточного содержания воды, в то время как тонкий слой остается близким к насыщению [9–11]. Расположенное на поверхности хвостов, продуцирующих кислые сточные воды, покрытие с капиллярным барьерным эффектом поможет снизить скорость диффузии кислорода, тем самым уменьшая скорость окисления сульфидов. Капиллярные барьеры также используются для уменьшения процессов диффузии кислорода сквозь груды пустой породы и мониторинга внутреннего потока жидкости [11–13].

#### ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ

Для получения сведений по количественным характеристикам распространения техногенных растворов в определенной среде (веществе гидроотвалов) требуются более точные измерения с помощью лабораторных моделей макропроцессов.

*Весовой метод* применялся для сбора данных по скорости капиллярного поднятия и геометрии фронта пропитки растворами образцов различных грунтов, взятых с отвалов. Отбирались пробы основного вещества исследуемых объектов и техногенных растворов, протекающих через отвалы.

Материал отвала помещали в сушильный шкаф и выдерживали 6 ч при температуре 105 °С. Далее высушенный грунт опускали в силиконовую трубку с внутренним диаметром 30 мм. Длина трубки с материалом ~ 200 мм. Трубка удерживалась штативом в вертикальном положении, нижний конец постоянно смачивался раствором (погружен в емкость с раствором на 2 мм)

(рис. 1а). Спустя зафиксированное время, когда через прозрачные стенки стало видно, что основной фронт пропитки поднялся выше середины, трубка снималась со штатива и разрезалась на сегменты по 50 мм (рис. 1б). Затем их взвешивали вместе с материалом, разрезали вдоль оси для более качественного высушивания и помещали на 6 ч в сушильный шкаф при температуре 105 °С. Масса сухого материала определялась вместе с сегментом трубки и отдельно измерялась масса сегментов трубки. В конце эксперимента вычислялись масса впитанного раствора на каждом сегменте, процент влажности, скорость распространения фронта пропитки и его примерная геометрия.

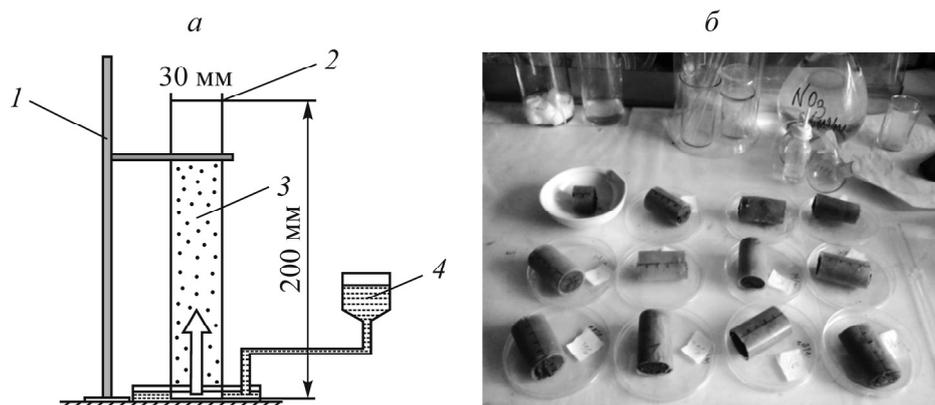


Рис. 1. Схема установки (а) и изображение трубки с веществом, разделенной на сегменты (б): 1 — штатив; 2 — силиконовая трубка; 3 — исследуемое вещество; 4 — раствор

На данном этапе работы сделана первая оценка описанного эксперимента по капиллярному подъему жидкости в поровом пространстве применительно к веществу отходов Комсомольского хвостохранилища Кемеровской области. Из методики опыта предполагается, что боковые поверхности и один из торцов образца непроницаемы, а свободный торец в начальный момент соприкасается со смачивающей жидкостью. В одномерном варианте это приводит к уравнению водонасыщенности  $S_w$ :

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} - d^2 \frac{\partial^2 \Phi(S_w)}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

где

$$\Phi(S_w) = - \int_0^{S_w} k_{r0}(S_w) F(S_w) J'(S_w) dS_w, \quad d^2 = \frac{\gamma \cos \theta}{\mu_w} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \Phi(S_w) = \frac{\mu_2 k_{r1}}{\mu_2 k_{rw} + \mu_1 k_{r0}},$$

здесь  $J$  — функция Леверетта;  $\gamma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  $k$  — абсолютная проницаемость;  $k_{r0}$ ,  $k_{rw}$  — относительные проницаемости;  $\mu_{w,0}$  — вязкость фаз;  $m$  — пористость.

Одномерная задача капиллярной пропитки (1) имеет автомодельное решение, которое зависит от безразмерного параметра вида  $\mathcal{S} = x / d\sqrt{t}$ , оно выражает скорость движения фронта пропитки. Решение (1), приведенное в [14], описывает процесс капиллярной пропитки на начальной стадии в первом приближении законом  $S \sim \sqrt{t}$ , совпадающим по форме с законом Вашбурна для подъема жидкости в простом капилляре [15].

*Метод кажущегося сопротивления.* Чтобы исследовать характер распространения кислотных волн в среде, собрана лабораторная установка: пластиковая труба 1 диаметром 100 мм, вертикально прикрепленная к штативу 2 при подключенной сети электродов с шагом по вертикали 50 мм между уровнями (рис. 2б). Сеть электродов состоит из 12 уровней по 4 противоположно расположенных медных электрода. Нижний конец трубы помещался в емкость с пропитывающим раствором 6. С помощью электроразведочного генератора АСТРА-100 3 на электроды *AB, BM, MN, NA* каждого уровня последовательно подавался электрический ток *I* величиной 1–10 мА с частотой 4.88 Гц. Многофункциональным электроразведочным измерителем МЭРИ 24 4 выполнялась съемка напряжений *V* на соответствующих противоположных электродах *MN, NA, AB, BM* (рис. 2а). Для каждой пары измерений рассчитывались сопротивления и коэффициенты установки. Далее полученные результаты с помощью программного средства визуализации трехмерных геопространственных данных Voxler преобразовывались в модель сопротивлений среды в определенный момент времени, из чего вычислялась скорость и описывался фронт распространения раствора в веществе.

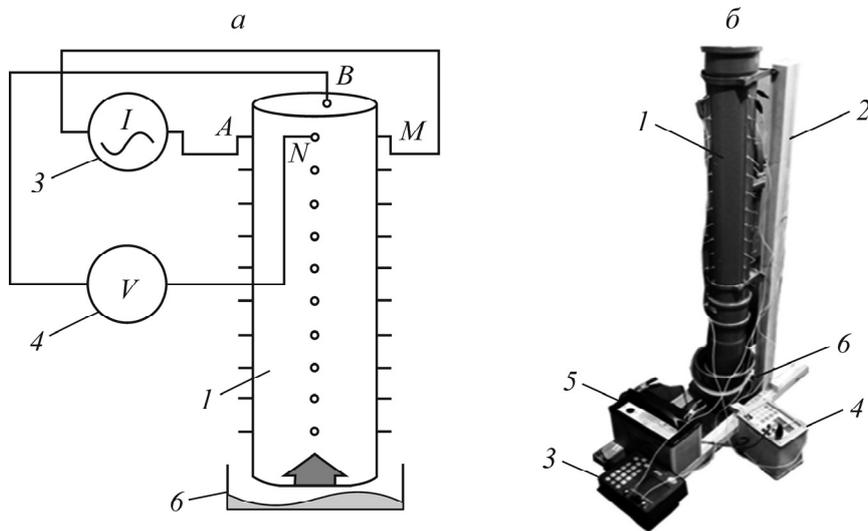


Рис. 2. Схема (а) и изображение (б) установки: 1 — пластиковая труба; 2 — штатив; 3 — электроразведочный генератор АСТРА-100; 4 — многофункциональный электроразведочный измеритель МЭРИ 24; 5 — аккумулятор 12 В; 6 — емкость с пропитывающим раствором

Инструментальные погрешности: измерения массы 0.01 г; генератора тока 0.5%; измерителя напряжения 10 мкВ. Сходимость результатов измерений показала большую величину случайной погрешности, которая на порядок превосходит сумму инструментальных погрешностей. Это связано с непостоянным путем прохода генерируемых электрических импульсов через вещество, заполняющее трубу.

Преимущество метода кажущегося сопротивления над весовым — возможность регистрации положения фронта пропитки в разные моменты времени без разрушения системы. Для определения коэффициента  $A$  при параметре  $\mathcal{G} = A\sqrt{t}$ , описывающим скорость движения фронта пропитки, используется метод наименьших квадратов и данные, собранные при помощи метода кажущегося сопротивления:

$$\sum_{i=1}^n \left( \mathcal{G}_i - \frac{A}{\sqrt{t}} \right)^2 \rightarrow \min . \quad (2)$$

При подстановке экспериментальных данных получаем, что выражение (2) имеет минимальное значение при  $A \approx 46$ . Для оценки коэффициента  $d$  подставим справочные данные по коэффициенту поверхностного натяжения и вязкости дистиллята, абсолютной проницаемости и пористости кварцевого песка, а также углу смачивания системы “дистиллят – кварцевый песок”:

$$d^2 = \frac{\gamma \cos \theta}{\mu_w} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Получим значение  $d$  в пределах  $2.7 \cdot 10^{-3} - 3.2 \cdot 10^{-3}$  м/ $\sqrt{с}$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Лабораторное моделирование процессов фильтрации техногенных растворов в твердом веществе отходов показало, что капиллярные силы вносят основной вклад в распространение растворов от источника загрязнения. Это позволило оценить характер и скорость процесса.

Первоначально исследовалось насыщение дистиллированной водой трех различных образцов грунта 1, 2, и 3, отобранных с разных точек Урского хвостохранилища (рис. 3). За 5 ч наблюдения все экземпляры грунтов пропитались на всю длину трубки (~200 мм), скорость движения фронта пропитки зафиксировать не удалось.

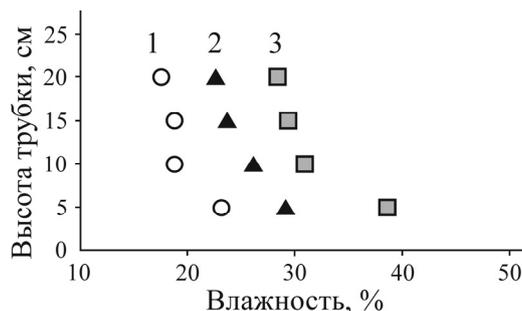


Рис. 3. Профили пропитки различных образцов грунта 1 – 3

Затем снова брали образец грунта 1 и визуально более тщательно фиксировали движение фронта во избежание полной пропитки образца (рис. 4а). Раствор пропитки — дистиллированная вода, время пропитки 24 ч, скорость фронта 180 мм/сут, скорость впитывания 39 г/сут. Поток через исследуемый образец диаметром 30 мм составил  $1.3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/сут. При тех же условиях в качестве флюида взяли реальный техногенный раствор из дренажного ручья с территории Комсомольского хвостохранилища (рис. 4б). Время пропитки составило 21.5 ч, скорость фронта жидкости в веществе отвала 140 мм/сут, скорость впитывания 25.6 г/сут.

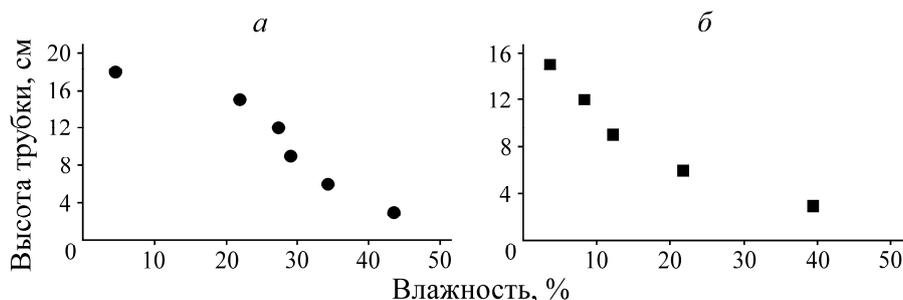


Рис. 4. Профиль насыщенности: а — дистиллированная вода; б — дренажный раствор

Сравнивая профили, обнаружили, что во втором случае кривая насыщенности проходит ближе к оси координат длины трубки. Это связано с тем, что в отличие от воды, которая распространяется сплошным фронтом, раствор пропитывает образец отдельными узкими каналами. Данный факт визуально подтверждается при разделении трубки на сегменты.

Приведем результаты экспериментов, выполненных методом электротомографии. За исходную среду брали чистый кварцевый песок, а в качестве флюида — дистиллированную воду. За первые 15 ч фронт продвинулся на 200 мм, т. е. средняя скорость  $\sim 13$  мм/ч (рис. 5а), в последующие 130 ч — на 75 мм, средняя скорость 0.5 мм/ч (рис. 5б). Это подтверждает зависимость скорости пропитки от времени  $g \sim 1\sqrt{t}$ .

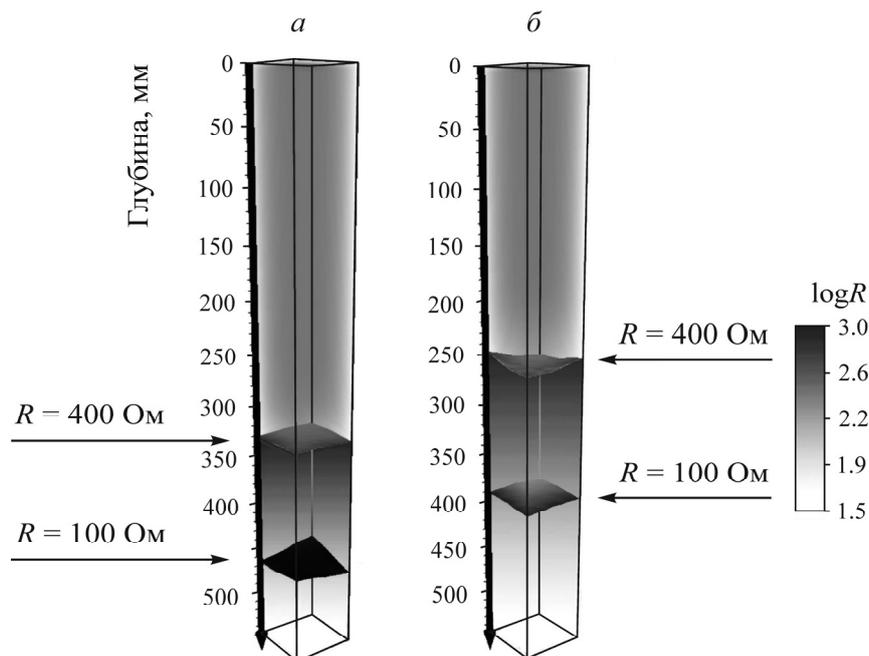


Рис. 5. Визуализация физического моделирования фильтрации флюидов в среде за 15 (а) и 145 ч (б)

Скорость пропитки грунта хвостохранилища достаточно высока в вертикальном и латеральном направлениях от источников техногенных растворов. Полученные данные объясняют широкое распространение техногенных растворов в окружающей среде на прилегающих к хранилищам территориях.

## ВЫВОДЫ

С помощью лабораторных экспериментов определены скорости пропитки техногенных грунтов дистиллированной водой и техногенным раствором. Поиск результативных методов изучения характера фильтрации дренажных растворов в геологической среде — насущная проблема при современном уровне изученности процессов миграции кислых техногенных потоков. Лабораторное моделирование процессов фильтрации техногенных растворов в твердом веществе отходов горнорудных предприятий показало, что капиллярные силы вносят основной вклад в распространение растворов от источника загрязнения. Это позволило оценить характер и скорость процесса. Характеристики распространения фронта зависят от параметров самих растворов и свойств среды. К таковым можно отнести физические свойства среды и фильтрата (пористость, проницаемость, плотность) и химический состав межпоровых растворов (кислотность, соленость, содержание растворенных твердых веществ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Джаманбаев М. Д., Чаныбаев М. К. Эволюция термогидродинамических полей в окрестности защитной дамбы хвостохранилища рудника Кумтор (Кыргызская Республика) // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 23–29.
2. Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л. О комплексной оценке состояния окружающей среды по данным дистанционного зондирования земли в регионах с высокой техногенной нагрузкой // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 199–209.
3. Чайников В. В. Системная оценка техногенных месторождений // Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений твердых полезных ископаемых. — 1999. — 75 с.
4. Юркевич Н. В., Карин Ю. Г., Кулешова Т. А. Состав отвала Белоключевского месторождения золота по данным электромагнитного сканирования и геохимического опробования // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XXI Междунар. симп. им. ак. М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященные 130-летию со дня рождения проф. М. И. Кучина. — 2017. — Т. 1. — С. 853–855.
5. Olenchenko V. V., Kucher D. O., Bortnikova S. B., Gas'kova O. L., Edelev A. V., and Gora M. P. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): Electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data, J. Russian Geol. and Geoph., 2016, Vol. 57, No. 4. — P. 617–628.
6. Bortnikova S., Olenchenko V., Gaskova O., Yurkevich N., Abrosimova N., Shevko E., Edelev A., Korneeva T., Provornaya I., and Eder L. Characterization of a gold extraction plant environment in assessing the hazardous nature of accumulated wastes (Kemerovo region, Russia), Applied Geochemistry, 2018, Vol. 93. — P. 145–157.
7. Kirillov M. V., Bortnikova S. B., Gaskova O. L., and Shevko E. P. Authigenic gold in stale tailings of cyanide leaching of gold–sulfide–quartz ores (Komsomol'skii Gold-Extracting Factory, Kemerovo Region), Doklady Earth Sciences, 2018, Vol. 481, No. 2. — P. 1091–1094.
8. Aachib M., Aubertin M., and Mbonimpa M. Laboratory measurements and predictive equations for gas diffusion coefficient of unsaturated soils, Proc. of 55<sup>th</sup> Canadian Geotechnical and Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Speciality Conferences, Niagara Falls, 2002. — P. 163–171.
9. Nicholson R. V., Gillham R. W., Cherry J. A., and Reardon E. J. Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers, J. Canadian Geotech., 1989, Vol. 26. — P. 1–8.
10. Aubertin M., Bussière B., Monzon M., Joanes A.-M., Gagnon D., Barbera J.-M., Aachib M., Bédard C., and Chapuis R. Etude sur les Barrière Sèches Construites a partir de Résidues Miniers: Phase II Essais en Place, NEDEM/MEND Report 2.22, 1999. — 2 p.
11. Bussière B., Aubertin M., and Chapuis R. The behaviour of inclined covers used as oxygen barriers, J. Canadian Geotech., 2003, Vol. 40, No. 3. — P. 512–535.
12. Mbonimpa M., Aubertin M., Aachib M., and Bussière B. Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials, J. Canadian Geotech., 2003, Vol. 40. — P. 916–932.
13. Molson J. W., Fala O., Aubertin M., and Bussière B. Numerical simulations of sulphide oxidation, Geochemical Speciation and Acid Mine Drainage in Unsaturated Waste Rock Piles, in submission to Environmental Geology, 2004.
14. Барабанов В. Л. Эмпирические параметры модели противоточной капиллярной пропитки горных пород // Геофизические исследования. — 2014. — Т. 15. — № 1. — С. 27–52.
15. Washburn E. W. The dynamics of capillary flow, Physical Review, 1921, Vol. 17. — P. 273–283.

*Поступила в редакцию 17/V 2019  
После доработки 9/VIII 2019  
Принята к публикации 23/IX 2019*