

## References

1. **Kuzjminyh A.N., Pashkov G.I.** Urozhainost i kachestvo vikožlakovyh agrotsenozov v usloviyah derno-vozvolistoj pochvy Nechernozemnoj zony. // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – № 3 (65). – S. 52...55.

2. **Malahova E.I., Khramoy V.K., Rakhimova O.V.** Zernovaya i belkovaya produktivnostj odnovidovyh i sovmestnyh posevov viki s ovsom pri raznyh urovnayah azotnogo pitaniya. // Izvestiya TSHA. – 2006. – Vyp. 4. – S. 42-46.

3. **Novoselov Yu.K.** Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu pollevyh opytov s kormovymi kulturami. – M.: RASHN, 1987. – 198 s.

4. **Dospekhov B.A.** Metodika polevogo opyta. – M.: Agropromizdat, 1985. – 351 s.

5. **Shumilin I.S.** Spravochnik – sostav i pitatel'nost kormov. – M.: Agropromizdat, 1986. – 303 s.

The material was received at the editorial office  
13.03.2018 g.

## Information about the authors

**Rakhimova Olga Vladimirovna**, candidate of agricultural sciences, associate profes-

sor of Kaluga branch of Federal State Budget Educational Institute of higher education «Russian State Agrarian University – MAA named after C.A. Timiryazev», 248007 Kaluga, Vishnevsky-Street, 27; tel.: +7(953)3291970; e-mail: TIR333@yandex.ru

**Khramoy Viktor Kirillovich**, doctor of agriculture, professor of Kaluga branch of Federal State Budget Educational Institute of higher education «Russian State Agrarian University – MAA named after C.A. Timiryazev», 248007 Kaluga, Vishnevsky-Street, 27; tel.: +7(4842)725016; e-mail: v.hramoy@yandex.ru

**Sikharulidze Tamila Davidovna**, candidate of agricultural sciences, associate professor of Kaluga branch of Federal State Budget Educational Institute of higher education «Russian State Agrarian University – MAA named after C.A. Timiryazev», 248007 Kaluga, Vishnevsky-Street, 27; tel.: +7(910)5416496; e-mail: tamila7958@yandex.ru

**Koroleva Svetlana Sergeevna**, candidate of pedagogical sciences, associate professor of Kaluga branch of Federal State Budget Educational Institute of higher education «Russian State Agrarian University – MAA named after C.A. Timiryazev», 248007 Kaluga, Vishnevsky-Street, 27; tel.: +7(965)7056801.

УДК 502/504:631.6:532.5

DOI 10.26897/1997-6011/2018-4-92-97

**В.В. АЛЕКСЕЕВ**

Чебоксарский кооперативный институт (филиал) автономной некоммерческой организации высшего профессионального образования Центросоюза Российской Федерации «Российский университет кооперации» г. Чебоксары, Российская Федерация

**Л.В. КИРЕЙЧЕВА**

Государственное бюджетное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, г. Москва, Российская Федерация

**И.И. МАКСИМОВ**

Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, г. Чебоксары, Российская Федерация

## **ДАВЛЕНИЕ СДВИГА ЖИДКОСТНОЙ «МАНЖЕТЫ» В МНОГОСЛОЙНО-ТОНКОСЛОЙНЫХ ВОДНЫХ ЭКРАНАХ**

*В статье рассматриваются вопросы снижения фильтрационных потерь при создании оросительных систем, водохранилищ, каналов, плотин и других гидротехнических сооружений путем формирования многослойно-тонкослойных экранов из разнородных грунтов. Разнородные материалы в условиях их переслаивания могут существенно снизить потери водопроницаемости, так как размеры пор в них сильно варьируют, а это приводит к появлению «жаменовских цепочек» – чередованию тонких отверстий (пор в грунте) с более крупными. Вода оказывается запертой в самых узких местах капилляра и рассредоточена по отдельным участкам. Поэтому такого рода капилляры могут являться слабопроницаемым экраном, поскольку образующиеся при контакте слоев мениски оказывают значительное сопротивление при фильтрации*

воды. Чем чаще чередуются слои и чем они тоньше, тем больше формируется менисков и сильнее снижается водопроницаемость многослойного экрана. Предложены расчетные зависимости, позволяющие определять давление, которое необходимо приложить к жидкостной «манжете» для перемещения ее по капилляру, чтобы она пришла в движение. При этом использованы известное уравнение Д. Жюрена и теория капиллярного потенциала, где потенциал рассматривается как работа по перенесению единицы массы жидкости из капилляра в свободную жидкость при той же температуре и на одном и том же высотном уровне. Приведены результаты расчетов сдвигового давления по радиусам эффективных капилляров для основных типов грунтов.

*Водопроницаемость, фильтрация, капилляры, радиусы кривизны, давление, переслаивание, многослойно-тонкослойный экран*

**Введение.** Коэффициент полезного действия оросительных систем определяется потерями воды на фильтрацию из оросительных каналов всех порядков. Одним из эффективных технических приемов по борьбе с фильтрацией из оросительных каналов является создание противофильтрационного экрана из искусственных или природных материалов с низкой водопроницаемостью. К ним относятся и многослойные экраны. В засушливых регионах при сооружении каналов и водоемов можно получить практически водонепроницаемое покрытие путем поочередной укладки слоев сухой песчаной и суглинистой почв. Комбинирование разнородных материалов в условиях их многослойной укладки существенно снижает потери воды на фильтрацию. Это связано с тем, что материалы, пропускающие воду, в условиях их переслаивания образуют на контакте слоев мениски, оказывающие значительное сопротивление фильтрации воды. Размеры пор в подбираемых материалах сильно варьируют, что приводит к появлению «жаменовских цепочек» – чередовании тонких отверстий с утолщениями. Вода оказывается запертой в самых узких местах капилляра и располагается отдельными участками. Если подать дополнительное давление на один из концов капилляра, то мениски, обращенные вогнутостью навстречу подаваемому давлению,

начнут сильнее прогибаться и, следовательно, менисковые удерживающие воду силы будут возрастать. Пузырьки «защемленного» воздуха, перекрывающие капилляр, а также и образующиеся при контакте слоев мениски, оказывающие значительное сопротивление процессу движения жидкости в капиллярах, снижают фильтрацию воды. Н.А. Качинским было установлено, что чем чаще чередуются слои и чем они тоньше, тем больше формируется менисков и тем сильнее снижается водопроницаемость многослойного экрана.

Высота поднятия жидкости в капилляре связана с его радиусом по известному уравнению Д. Жюрена, из которого следует, что чем тоньше капилляр, тем выше должна подняться вода. При рассмотрении реальных почв уравнение справедливо только в определенных пределах. Если капилляры имеют диаметр менее  $10^{-8}$  м, то формула Д. Жюрена не применима. В таких, достаточно тонких капиллярах для капиллярной воды нет места, поскольку все пространство занято пленочной и адсорбированной водой [3, 4]. Поэтому, например, высота капиллярного поднятия воды от уровня грунтовых вод в глинах больше, чем в тяжёлых глинах (табл. 1). Там же приведены рассчитанные по формуле Д. Жюрена радиусы эффективных капилляров, соответствующие приведенным значениям высоты.

Таблица 1

**Высота капиллярного поднятия воды (усредненные данные)**

Почва	Высота капиллярного поднятия воды, м	Радиус эффективного капилляра, $10^{-5}$ м
Пески	0,4-0,8	1,88-3,75
Супеси	0,8-1,2	1,25-1,88
Суглинки	1,2-3,5	0,42-1,25
Глины	3,5-6,0	0,25-0,42
Тяжелые глины	до 4,5	до 0,33

Кроме того, даже если упрощенно рассматривать поровое пространство почвы за цилиндрическое, то капилляр в почвах практически всегда имеет переменный диаметр. При чередовании тонких отверстий с утолщениями вода, при неполном заполнении поры, будет находиться только в самых узких местах капилляра и располагаться отдельными участками, получившими название «жаменовских цепочек». Выдавить воду из такого капилляра достаточно тяжело.

Если подать дополнительное давление на один из концов капилляра, то мениски, обращенные вогнутостью навстречу подаваемому давлению, начнут сильнее прогибаться, и, следовательно, менисковые удерживающие воду силы будут возрастать. Жидкость оказывается запертой в таких «жаменовских цепочках». Поэтому такого рода капилляры могут являться газоводонепроницаемыми [5, 6].

В мелиорации при сооружении каналов практически непроницаемую водоупорную систему можно создать путем поочередной укладки слоев сухой песчаной и суглинистой почв.

**Теория и методы.** Рассмотрим капиллярный потенциал как работу по переносу единицы массы жидкости из капилляра в свободную жидкость при постоянной температуре и на одном и том же высотном уровне. При этом удельную объемную энергию свободной жидкости можно принять за нулевой уровень, относительно которого можно отсчитывать удельную энергию в капилляре. Рассмотрим систему, состоящую из сухого капилляра и некоторого количества свободной жидкости (рис. 1).

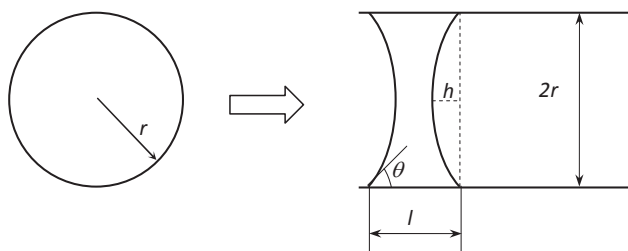


Рис. 1. Образование «манжеты»

Общая энергия такой системы определяется поверхностной энергией капилляра, так как энергия свободной жидкости равна нулю:

$$E_0 = 2prls_{sg}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус капилляра;  $l$  – длина капилляра;  $s_{sg}$  – свободная энергия единицы площади сухого капилляра (т.е. границы раздела твердое тело – газ).

После соприкосновения капилляра с жидкостью, энергию системы можно выразить уравнением:

$$E = 2prls_{sl} + 2p(r^2 + h^2) s_{lg} + A, \quad (2)$$

где  $2prls_{sl}$  – поверхностная энергия границы раздела твердое тело–жидкость;  $2p(r^2 + h^2) s_{lg}$  – поверхностная энергия границы раздела жидкость–газ ( $h$  – стрела шарового сегмента);  $A$  – работа по втягиванию жидкости в капилляр, равная  $prls_{lg}$ .

Поскольку жидкость перестает быть свободной, «уменьшение» ее энергии при втягивании в капилляр определяется разностью  $E_0 - E$ , т.е. выражением:

$$DE = 2prls_{sg} - 2prls_{sl} - 2p(r^2 + h^2) s_{lg} - prls_{gl}, \quad (3)$$

или, учитывая известную формулу Неймана, получим:

$$DE = 2prls_{gl} - 2p(r^2 + h^2) s_{lg} - prls_{gl}. \quad (4)$$

Для удобства расчетов примем количество свободной жидкости равной объему шара, радиус которого равен радиусу капилляра. В случае несжимаемой жидкости, учитывая неизменность объема жидкости в процессе втягивания в капилляр, можно записать:

$$\frac{3}{4} \pi r^3 = \pi r^2 l - \frac{2}{6} \pi h(3r^2 + h^2). \quad (5)$$

Теперь выразим длину смоченного участка капилляра через стрелу шарового сегмента  $h$ :

$$l = \frac{4r^3 + 3r^2 h + h^3}{3r^2}. \quad (6)$$

Подставим значение  $l$  из (6) в выражение (4) и возьмем производную  $\frac{d(\Delta E)}{dh}$ . Приравняв эту производную к нулю, найдем значение  $h$ , при котором «потеря» энергии системы максимальна, то есть система находится в состоянии энергетического равновесия:

$$h = -\frac{4r \pm \sqrt{16r^2 - 4r^2}}{2r}. \quad (7)$$

Учитывая, что  $h \leq l$ , получаем:

$$h = (2 - \sqrt{3})r = Cr, \quad (8)$$

где  $C$  – постоянная.

Все приведенные выше рассуждения были основаны на предположении, что жидкость вполне смачивает капилляр, то есть краевой угол смачивания равен  $\theta$  и при его обычном определении равен нулю.

В реальных условиях  $\theta = 0$  только для очень чистых, лишенных адсорбционных оболочек капилляров. Обычно краевой угол  $\theta$  отличен от нуля. Поэтому при нахождении реального значения  $h$  следует учитывать значение угла  $\theta$ .

Из простых геометрических соотношений можно показать, что  $h = Br$ , где

$$B = \frac{1 - \sqrt{1 - \cos^2 \theta}}{\cos \theta}. \quad (9)$$

Обобщая выражения (8) и (9), найдем окончательно:

$$h = CB r. \quad (10)$$

Из геометрических соотношений следует:

$$\cos \theta_1 = \frac{2h}{1 + C^2 B^2}, \quad (11)$$

что позволяет вычислить краевой угол  $\theta$  «манжеты» при полном смачивании. Для воды в стеклянном капилляре  $\theta_1 = 60^\circ$ . Найдем капиллярный потенциал для манжеты:

$$\varphi = \frac{\Delta E}{m} = \frac{\Delta E}{V \rho}, \quad (12)$$

где  $m$  – масса жидкости;  $V$  – объем жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости.

Воспользуемся теорией размерностей.

$$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \frac{H \cdot \text{м}}{\text{кг}} = \frac{\frac{H \cdot \text{м}}{\text{м}^3}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{H}{\text{м}} \quad (13)$$

следовательно,

$$\varphi = \frac{\Delta P}{\rho}.$$

Приравнявая (12) и (13), получим:

$$\frac{\Delta E}{V \rho} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad \text{или} \quad \Delta P = \frac{\Delta E}{V} \quad (14)$$

где  $\Delta P$  – изменение давления в жидкости, находящейся в капилляре по отношению к давлению в свободной

жидкости на том же высотном уровне. Из уравнений (4) и (14) следует:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{2\pi r l \sigma_{gl}}{V} - \frac{2\pi(r^2 + h^2)\sigma_{gl}}{V} - \frac{\pi r l \sigma_{gl}}{V} = \\ &= \Delta P_1 - \Delta P_2 - \Delta P_3 \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\Delta P_1$  – внутреннее давление, создаваемое силами взаимодействия молекул жидкости с твердой стенкой, которое не меняется, по крайней мере, до момента начала движения «манжеты»;  $\Delta P_2$  – внутреннее отрицательное давление – «натяжение» жидкости, создаваемое границами раздела жидкость-газ, которое можно предположить неизменным до начала движения;  $\Delta P_3$  – внутреннее отрицательное давление, связанное с работой по втягиванию жидкости в капилляр, которое может меняться при изменении формы манжеты под действием одностороннего внешнего давления.

Условием начала движения «манжеты» – ее крайних точек – является равенство

$$|\Delta P_3| = \Delta P' \quad (16)$$

где  $\Delta P'$  – внешнее газовое давление, действующее на «манжету» с одной стороны, под действием которого крайние точки «манжеты» начинают перемещаться – «сдвиговое» давление.

Таким образом, искомое «сдвиговое» давление:

$$\Delta P' = \frac{\pi r l \sigma_{gl}}{V} \quad (17)$$

где  $V = \pi r^2 l - \frac{2}{6} \pi h (3r^2 + h^2)$  – объем жидкости в «манжете».

Подставляя  $h$  из (10) в уравнение (17), после преобразований получим:

$$\Delta P' = \frac{3l}{3l - r (3CB + C^3 B^3)} \frac{\sigma_{gl}}{r} \quad (18)$$

Результаты расчетов сдвигового давления по радиусам эффективных капилляров в почвах приведены для песков, супесей, суглинков, глин и тяжелых глин с учетом значений радиусов эффективных капилляров, значение которых представлено в таблице 1. Как видно из таблицы 2, для используемой в гидротехнике и мелиорации поочередной укладки пары слоев сухой песчаной и суглинистой почв разность давлений лежит в интервале от 2 до 15,5 кПа, т.е. даже одна граница между слоями может удерживать напор водного столба от 0,2 до 1,5 м.

## Сдвиговые давления (усредненные данные)

Почва	Сдвиговое давление, Па
Пески	1947-3883
Супеси	3883-5840
Суглинки	5840-17381
Глины	17381-29200
Тяжелые глины	22121

## Выводы

Предложены и апробированы зависимости, позволяющие рассчитать давление, которое необходимо приложить к жидкостной «манжете» для перемещения ее по капилляру, чтобы она пришла в движение. При этом потенциал рассматривается как работа по перенесению единицы массы жидкости из капилляра в свободную жидкость при той же температуре и на одном и том же высотном уровне. Это позволяет подобрать как типы почв и грунтов, так и рассчитать количество и толщину слоев при комбинировании разнородных материалов для их послойной укладки с целью создания многослойно-тонкослойного противодиффузионного экрана для каналов или водохранилищ в зависимости от технических параметров объекта. Потери воды на фильтрацию при этом минимизируются, а расчет многослойно-тонкослойных экранов получает теоретическую основу.

## Библиографический список

1. **Зайдельман Ф.Р.** Мелиорация почв: Учебник. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – 448 с.
2. Мелиорация земель. Учебник. под ред. А.И. Голованова. – М.: КолосС, 2011. – 824 с.
3. **Алексеев В.В., Максимов И.И.** Аэродинамический метод получения основной гидрофизической характеристики почв. // Почвоведение. – 2013. – № 7. – С. 822-828
4. **Сысуев В.А., Максимов И.И., Алексеев В.В., Максимов В.И.** Получение основной гидрофизической характеристики почв на основе трехмерных моделей. // До-

клады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2013. – № 5. – С. 63-66.

5. Теории и методы физики почв. Коллективная монография. / Под ред. Е.В. Шеина и Л.О. Карпачевского. – М.: Гриф и К, 2007. – 616 с.

6. Новые приборы для изучения физических свойств почв: 3D-томография, реологические параметры, контактный угол. / Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., и др. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета – 2014. – № 5 (115). – С. 44-48.

Материал поступил в редакцию 06.03.2018 г.

## Сведения об авторах

**Алексеев Виктор Васильевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий и математики, Чебоксарский кооперативный институт РУК; 428025, г. Чебоксары, пр. М. Горького, д. 24, e-mail: av77@list.ru

**Кирейчева Людмила Владимировна**, ORCID: 0000-0002-7114-2706, доктор технических наук, профессор, научный руководитель направления ФГНБУ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова; 127550, Москва, ул. Большая Академическая, д. 44. кор.2, тел.: +7(499)1541326, e-mail: kireychevalw@mail.ru

**Максимов Иван Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортно-технологических машин и комплексов; Чувашская государственная сельскохозяйственная академия; 428025, г. Чебоксары, ул. Карла Маркса д. 29.

**V.V. ALEKSEEV**

Branch of the Cheboksary cooperative Institute, of the autonomous non-commercial organization of higher vocational education of the Central Unit of the Russian Federation «Russian university of cooperation», Cheboksary, Russian Federation

**L.V. KIREYCHEVA**

State budgetary scientific institution: All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Reclamation named after A.N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation

**I.I. MAKSIMOV**

Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary, Russian Federation

## **SHEARING PRESSURE OF THE LIQUID «CUFF» IN MULTILAYER – THIN LAYER WATER SCREENS**

*The article is dealt with the reduction of filtration losses in irrigation projects, reservoirs, canals, dams and other hydraulic structures by the means of multilayer-thin layer screens made of heterogeneous soils. Heterogeneous materials when they are interstratified can significantly reduce water permeability losses as pore sizes in them vary greatly which leads to the of “zhamenov chains” – alternation of thin holes (pores in soil) with larger ones. Water is locked in the narrowest capillaries and dispersed in separate parts. Therefore, capillaries of this kind can be a weak anti-filtration screen because the menisci which are formed by the contact of layers have a significant resistance when water filtering. The more often the layers alternate and the thinner they are, the more meniscus are formed and the more heavily water permeability of the multilayer screen decreases. There are proposed calculated dependencies allowing determining the pressure which is needed to apply to the liquid «cuff» in the capillary with the same radius to make it move. Using the known equation of D. Zhurena and theory of the capillary potential where the potential is considered as a work to transfer a unit of fluid mass from the capillary into a free liquid at the same temperature and at the same altitude level. There are given calculation results of the shearing pressure on the radii of effective capillaries for the main types of soil.*

*Water permeability, filtration, capillaries, radii of curvature, pressure, interstratifying, multilayer – thin layer screen.*

### **References**

1. **Zajdelman F.R.** Melioratsija pochv: Uchebnik. – 3-e izd., ispr. i dop. – M.: Izd-vo MGU, 2003. – 448 s.
2. Melioratsija zemel / A.I. Golovanov, I.P. Ajdarov, M.S. Grigorov i dr.; pod red A.I. Golovanova. – M.: KolosS, 2011. – 824 s.
3. **Alekseev V.V., Maksimov I.I.** Aerodinamicheskij metod poluchenija osnovnoj gidrofizicheskoj karakteristiki pochv. // Pochvovedenie № 7, 2013. S. 822-828
4. **Sysuev V.A., Maksimov I.I., Alekseev V.V., Maksimov V.I.** Poluchenie osnovnoj gidrofizicheskoj karakteristiki pochv na osnove trehmernyh modelej, // Doklady Rossijskoj akademii seljskohochozjajstvennyh nauk № 5, 2013. – S. 63-66.
5. Teorii i metody fiziki pochv. Kollektivnaja monografija. / Pod red. E.V. Sheina i L.O. Karpachevskogo. – M.: Grif i K, 2007. 616 s.
6. Novye pribory dlja izuchenija fizicheskikh svojstv pochv: 3D-tomografija, geologicheskie parametry, kontaktnyj ugol. / E.V. Shein, E.Ju. Milanovskij, D.D. Hajdapova, i dr. //

Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. № 5 (115), 2014 S. 44-48.

The material was received at the editorial office  
06.03.2018 g.

### **Information about the authors**

**Alekseev Viktor Vasilyevich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Chair of Information Technologies and Mathematics, Cheboksary Cooperative Institute, Cheboksary (Russia), e-mail: av77@list.ru

**Kireycheva Lyudmila Vladimirovna**, ORCID: 0000-0002-7114-2706, Prof., Doctor of technical Sciences, All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after. A.N. Kostyakova, Russia, Moscow, e-mail: kireychevalw@mail.ru

**Maksimov Ivan Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Complexes, Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary (Russia)