

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- и МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ТФЖ

И
НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 88, № 2

Vol. 88, No. 2

МАРТ–АПРЕЛЬ
MARCH–APRIL

2015

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1958 г.

2015. ТОМ 88, № 2 (МАРТ–АПРЕЛЬ)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Филиппов А. И., Ахметова О. В. Одномерные монохроматические плоские фильтрационные волны	285
Галиуллина Н. Е., Храмченков М. Г. О некоторых особенностях деформирования ненасыщенных набухающих пористых сред	291
Келбалиев Г. И., Рзаев Аб. Г., Расулов С. Р., Гусейнова Л. В. Моделирование фильтрации аномальных нефтей в пористом пласте	296
Теплицкий Ю. С., Рослик А. Р. О динамике тепловыделяющего зернистого слоя	302
Рохман Б. Б. Теоретическое исследование процесса парокислородной газификации коксозольных частиц в псевдооживленном слое под давлением	309
Власюк А. П., Жуковская Н. А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния основания грунтовой плотины со свободной поверхностью под влиянием тепло- и массопереноса в двумерном случае	324
Сабденов К. О., Жолдыбаева Г. Т. Осаждение на поверхность земли тяжелых частиц из сферического облака. Аналитическое решение	336

НАНОСТРУКТУРЫ

Комаров Ф. Ф., Кривошеев Р. М., Ксенофонтов М. А., Колтунович Т., Абдуллин Х. А., Островская Л. Е., Тогамбаева А. К. Формирование композита на основе полиуретана с углеродными нанотрубками и шунгитом	344
Комаров Ф. Ф., Пилько В. В., Климович И. М. Влияние условий нанесения наноструктурированных покрытий из Ti–Zr–Si–N на их состав, структуру и трибомеханические свойства	350
Футько С. И., Шулицкий Б. Г., Лабунов В. А., Ермолаева Е. М. Параметрическое исследование кинетики роста массива углеродных нанотрубок на наночастицах железа в процессе химического парофазного осаждения углеводородов	355

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ

Полежаев Ю. В., Гешеле В. Д., Стоник О. Г., Раскатов И. П., Соловьев В. Н., Плещанков И. Г., Бида Л. А., Левчук А. С., Фокина Г. И. Снижение эмиссии ¹³⁷ Cs в атмосферу при сжигании загрязненного радионуклидами твердого топлива в условиях возбуждения термоакустических автоколебаний и газодинамических пульсаций	364
Миньков Л. Л., Шрагер Э. Р. Оптимальное распределение частиц металла в заряде твердого топлива в приближении одномерного поля течения в цилиндрическом канале	371
Нгуен Тху Нга, Нгуен Тхе Чанг. Изучение влияния процесса брожения на выработку биогаза из отходов ананаса штаммами <i>Methanobacterium</i> , выделенными во Вьетнаме	380

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Кудинов И. В., Кудинов В. А. Определение динамических напряжений в пластине на основе точного аналитического решения гиперболического уравнения теплопроводности	386
Кудинов И. В., Кудинов В. А. Математическая модель локально-неравновесного теплопереноса с учетом пространственно-временной нелокальности	393
Кот В. А. Тожества взвешенной температуры	409
Чалая И. В., Круковский П. Г. Расчетный анализ теплового состояния несущих металлических конструкций стадиона при различных сценариях пожара	425
Штеников В. Н. Анализ возможностей обеспечения высокого качества механизированной пайки	433

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Исаев С. А., Гузеев А. С., Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А.В. Визуализация течения в сферической лунке на стенке канала прямоугольного сечения гидродинамической трубы и численная идентификация струйно-вихревых структур	438
Серебрянский Д. А., Семенюк Н. В., Плашихин С. В. Исследование величины аэродинамического сопротивления восьмиканального центробежного фильтра.....	455
Гамзаев Х. М. О моделировании нестационарного течения нелинейно-вязких жидкостей по трубопроводу.....	464
Кулиев С. З. Численный метод решения коэффициентно-обратной задачи для неустановившегося движения в нефтепроводе	470
Кусаинов К., Камбарова Ж. Т., Танашева Н. К., Шаймерденова К. М., Алибекова А. Р. Исследование обтекания парусной лопасти ветротурбины.....	481
Алексеев Н. И., Твердохлебов К. В., Жуков Б. Г., Куракин Р. О., Бобашев С. В. Оптимальные газодинамические условия использования рельсового ускорителя для напыления различных материалов на поверхности мишеней	487
Пимштейн В. Г. Об излучении звука при натекании сверхзвуковой струи на препятствие.....	500
Vishwakarma J. P. and Nanhey Patel. Magnetogasdynamic Cylindrical Shock Waves in a Rotating Nonideal Gas with Radiation Heat Flux.....	502

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Попов В. М., Дорняк О. Р. Теплопроводность клеевых прослоек соединений на клеях, модифицированных воздействием комбинированных физических полей.....	511
Федотов А. Ф. Выбор и верификация феноменологических моделей вязкости суспензий.....	516

РАЗНОЕ

Kumar Rajneesh and Kaur Mandeep. Effect of Two Temperatures and Stiffness on the Waves Propagating at an Interface of Two Micropolar Thermoelastic Media	522
Бакулин В. Н., Ларин А. А., Резниченко В. И. Повышение качества изготовления изделий из полимерных композиционных материалов с использованием компьютерной томографии как метода неразрушающего контроля.....	534

ЛЮДИ НАУКИ

К 90-летию Евгении Моисеевны Хабахпашевой	539
--	-----

ПОПРАВКА

Валухов С. Г., Кретинин А. В., Стогней О. В. Использование нейросетевой аппроксимации для прогнозирования микротвердости нанокompозитных покрытий. Т. 87, № 2, 2014 г.....	540
---	-----

ПОПРАВКА

Кухленко А. А., Орлов С. Е., Иванова Д. Б., Василишин М. С. Исследование процесса растворения полидисперсных материалов в установке с роторно-пульсационным аппаратом. Т. 88, № 1, 2015 г.....	541
---	-----

Подготовка оригинал-макета и сопровождение компьютерной системы в Internet осуществляется в редакции "Инженерно-физического журнала",
Государственное научное учреждение "Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси"

Ответственный за выпуск: Л. Н. Шемет

Подписано в печать 09.03.2015. Формат 60×84%. Бумага офисная.
Усл. печ. л. 30,11. Уч.-изд. л. 26,54. Тираж 134 экз. Зак. № 7

Государственное научное учреждение
"Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси"
220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации
№ 218 от 06.04.2009, выданное Министерством информации Республики Беларусь.
Государственное научное учреждение
"Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси"
ЛП № 02330/451 от 18.12.2013.
220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15

УДК 532.546

*Н. Е. Галиуллина, М. Г. Храмченков***О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕНАСЫЩЕННЫХ
НАБУХАЮЩИХ ПОРИСТЫХ СРЕД**

Исследовано поведение ненасыщенных набухающих пористых сред под нагрузкой. Получены уравнение ненасыщенной фильтрации в набухающих пористых средах и уравнение, связывающее объемную деформацию среды с величиной приложенной нагрузки. Проведено сравнение результатов расчетов по этим уравнениям с соответствующими экспериментальными данными.

Ключевые слова: набухающая пористая среда, почвогрунт, ненасыщенная фильтрация.

Введение. Процессы, протекающие в пористых средах, поры которых не полностью насыщены влагой (ненасыщенных пористых средах), представляют интерес для многих наук о Земле и технологий. В частности, изучение влагопереноса в таких системах является важнейшей задачей физики почв и агроэкологии. Важно учитывать деформирование ненасыщенных грунтов при строительстве, в частности, для определения долговременной устойчивости оснований и фундаментов зданий. Подобные задачи приходится решать также при изготовлении и использовании порошковых материалов. Особый интерес представляют пористые среды, способные включать содержащуюся в их порах влагу в состав частиц скелета (набухающие пористые среды).

В настоящей работе исследуются процессы влагопереноса в ненасыщенных почвах и грунтах и особенности их деформирования под действием приложенной к ним нагрузки. В связи с этим применительно к объекту исследования мы будем использовать устоявшийся в отечественной литературе термин "почвогрунт".

Изучение указанных процессов имеет давнюю историю, в том числе с использованием методов математического моделирования [1]. Во многих работах по изучению и особенно по моделированию физико-механических и физико-химических свойств почвогрунтов почва моделировалась недеформируемой и не набухающей пористой средой, находящейся в условиях неполного насыщения влагой. Важнейшим элементом такой модели является движение почвенной влаги под действием капиллярных и гравитационных сил — ненасыщенная фильтрация. С момента появления уравнений для описания процесса ненасыщенной фильтрации (уравнений Ричардса) и возникновения необходимости идентификации входящих в них констант столь простой, на первый взгляд, процесс является предметом пристального научного интереса в течение уже достаточно продолжительного времени, при этом почва представляется в виде системы капилляров сложной формы.

Для детального описания процессов, протекающих в почвогрунтах, необходимо учитывать их деформацию, а также гистерезис смачивания и электрокинетические явления, являющиеся следствием наличия на поверхности почвенных и грунтовых частиц адсорбированных зарядов [2]. Однако даже учет всех этих факторов не дает картину реального почвенного или грунтового агрегата (почвенной частицы или частицы грунта). Поэтому для решения поставленной задачи необходимо, прежде всего, описать внутреннюю структуру частицы почвогрунта.

Почвогрунт является пористой средой, структурные единицы которой представляют собой соединения мелких неорганических и органических частиц. При этом природа и характер взаимодействия этих частиц определяют в значительной степени свойства почвогрунта в целом. Это можно продемонстрировать на следующем примере. В составе почвы могут находиться глинистые минералы, частицы которых несут на себе, вследствие гетеровалентного изоморфизма, отрицательный электрический заряд [3], компенсируемый адсорбцией положительно заряженных частиц (катионов) почвы. В некоторых случаях катионы-компенсаторы непрочно связаны с поверхностью глинистых минералов и способны отделяться от их частиц, например при гидратации почвы в растворах или в парах воды. В итоге это приводит к набуханию глинистых частиц и системы в целом. Отличительной чертой почвогрунта с точки зрения происходящих в нем физико-химических процессов является способность удержания в его частицах воды без потери структурной целостности при набухании. При этом по-

членные частицы никоим образом нельзя отождествлять с твердыми частицами, несмотря на то, что некоторые компоненты почвогрунта являются фрагментами твердых (в механическом смысле) тел.

В этой связи целью настоящей работы является математическое описание переноса влаги (ненасыщенной фильтрации) в объеме почвогрунта, представляющего собой пористую среду, набухающую при контакте с парами воды либо с растворами электролитов.

Фильтрация в набухающем почвогрунте. Запишем уравнение баланса массы (переноса массы) флюида в способном набухать почвогрунте:

$$\frac{\partial(mS\rho)}{\partial t} + \operatorname{div}(m\rho S\mathbf{V}) = -j, \quad (1)$$

и уравнение баланса массы (переноса массы) условно твердого вещества пористого скелета грунта:

$$\frac{\partial[(1-m)\rho_s]}{\partial t} + \operatorname{div}[(1-m)\rho_s\mathbf{W}] + j = 0. \quad (2)$$

При этом для массы условно твердой фазы грунта справедливо соотношение

$$M_s = \rho_s^0 V_s^0 + \rho[(1-m)V - V_s^0], \quad \rho_s^0 V_s^0 = M = \operatorname{const}. \quad (3)$$

Коэффициент объемного расширения почвогрунта определяется как [4]

$$\theta = (V - V_0)/V_0. \quad (4)$$

Заметим, что в случае уменьшения объема почвогрунта при деформации определение (4) совпадает с определением его относительной усадки.

Используя предположение о малости коэффициента объемного расширения почвогрунта, будем с достаточной точностью полагать, что

$$V = V_0 \exp \theta, \quad V_0 = V(\theta = 0). \quad (5)$$

Тогда, используя (5), запишем (3) в виде

$$M_s = M(1 - \varepsilon) + \rho(1 - m)V, \quad \varepsilon = \rho/\rho_s^0 \leq 1.$$

Дифференцируя последнее уравнение по времени, получаем

$$\frac{\partial M_s}{\partial t} = -M \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (1 - m)V \frac{\partial \rho}{\partial t} + (1 - m)\rho V \frac{\partial \theta}{\partial t} - \rho V \frac{\partial m}{\partial t}. \quad (6)$$

Плотность условно твердой фазы и ее переток j определяются из соотношений

$$\rho_s = \frac{M_s}{(1 - m)V} = \rho + \frac{M(1 - \varepsilon)}{(1 - m)V}, \quad j = \frac{1}{V} \frac{\partial M_s}{\partial t}.$$

Дифференцируя уравнение (2), получаем

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - m)\rho + \frac{M(1 - \varepsilon)}{V} \right] + \operatorname{div} \left\{ \left[(1 - m)\rho + \frac{M(1 - \varepsilon)}{V} \right] \mathbf{W} \right\} = \frac{1}{V} \frac{\partial M_s}{\partial t}. \quad (7)$$

Используя (6) и проводя последовательные дифференцирования в (7), получаем в итоге выражение для скорости объемной деформации почвогрунта, выраженную через дивергенцию скорости твердой фазы:

$$\partial\theta/\partial t = \operatorname{div} \mathbf{W}. \quad (8)$$

Далее, вводя относительную скорость движения флюида в почвогрунте (скорость фильтрации) $\mathbf{q} = mS(\mathbf{V} - \mathbf{W})$, с учетом (1) и (8) получаем

$$mS \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho S \frac{\partial m}{\partial t} + m\rho \frac{\partial S}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\mathbf{q}) + \operatorname{div}(\rho mS\mathbf{W}) + j = 0. \quad (9)$$

Преобразование последнего уравнения в пренебрежении по тем же причинам, что и выше, членами второго порядка малости $\mathbf{q} \operatorname{grad} \rho$ и $\mathbf{W} \operatorname{grad}(m\rho)$ дает

$$mS\rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial t} + S \frac{\partial m}{\partial t} + m \frac{\partial S}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} + mS \frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{1}{\rho V} \frac{\partial M_s}{\partial t}. \quad (10)$$

С учетом (6) сомножитель правой части уравнения (10) переходит в уравнение

$$- \frac{1}{V} \frac{\partial M_s}{\partial t} = \frac{M}{V} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - (1 - m) \frac{\partial \rho}{\partial t} - (1 - m)\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho \frac{\partial m}{\partial t}. \quad (11)$$

После деления этого выражения на плотность воды получаем с учетом (10) и (11) следующее соотношение:

$$\begin{aligned} mS\rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial t} + S \frac{\partial m}{\partial t} + m \frac{\partial S}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} + mS \frac{\partial \theta}{\partial t} = \\ = \frac{M}{\rho V} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - (1 - m)\rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial t} - (1 - m) \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial t}. \end{aligned} \quad (12)$$

Приводя общие члены в уравнении (12), получаем

$$\begin{aligned} [mS + (1 - m)]\rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial t} + m \frac{\partial S}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} + [mS + (1 - m)] \frac{\partial \theta}{\partial t} = \\ = \frac{M}{\rho V} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (1 - S) \frac{\partial m}{\partial t}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для ненасыщенной фильтрации резонно считать, что

$$\rho, \rho_s^0 = \text{const} \Rightarrow \varepsilon = \text{const}.$$

Тогда уравнение (13) можно переписать как

$$m \frac{\partial S}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} + [1 - (1 - S)m] \frac{\partial \theta}{\partial t} = (1 - S) \frac{\partial m}{\partial t} \quad (14)$$

или в несколько ином виде

$$- \frac{\partial [m(1 - S)]}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} + [1 - (1 - S)m] \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) полностью совпадает с полученным в [5] уравнением баланса массы воды при ненасыщенной фильтрации в набухающей почве. Однако влажность S в уравнении (15) определена нами как доля воды в транспортных порах почвы, в то время как в физике почв принято использовать общую влажность s , т. е. долю воды в общем объеме пор почвы или грунта. Для учета этого фактора рассмотрим очевидное соотношение, связывающее s и S :

$$mSV = (m + m_c)sV - m_cV, \quad m_c = \frac{[(1 - m)V - V_s^0]}{V}. \quad (16)$$

Из (16) следует, что

$$S = \left(1 + \frac{m_c}{m}\right)s - \frac{m_c}{m}. \quad (17)$$

Тогда, подставляя выражение (17) в уравнение (15), получаем

$$-\partial[(m + m_c)(1 - s)]/\partial t + \operatorname{div} \mathbf{q} + [1 - (1 - s)(m + m_c)]\partial\theta/\partial t = 0. \quad (18)$$

Сумма $(m + m_c)$ представляет собой общую пористость почвы. Вводя обозначение

$$m + m_c = 1 - V_s^0/V = n, \quad (19)$$

запишем (18) с учетом (19) в виде

$$-\frac{\partial[n(1-s)]}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} + [1 - n(1-s)]\partial\theta/\partial t = 0. \quad (20)$$

В частном случае, когда $m_c = 0$ и $m = n$, из (6) следует, что

$$(1 - m)\partial\theta/\partial t = \partial m/\partial t. \quad (21)$$

Подставляя (21) в (20), получаем

$$\frac{m\partial s}{\partial t} + \frac{s\partial\theta}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} = 0. \quad (22)$$

Уравнение (22) получено независимо А. В. Костериним для процесса влагопереноса в ненабухающих ненасыщенных пористых средах [6].

Деформирование ненасыщенных набухающих почвогрунтов. Рассмотрим процесс деформирования ненасыщенного почвогрунта под действием нагрузки. Для этого запишем уравнение (13) в виде

$$\begin{aligned} [1 + m(1 - S)]\rho^{-1} \frac{\partial\rho}{\partial t} + m \frac{\partial S}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} + [1 + m(1 - S)] \frac{\partial\theta}{\partial t} = \\ = \frac{M}{\rho V} \frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + (1 - S) \frac{\partial m}{\partial t}. \end{aligned} \quad (23)$$

В последнем уравнении резонно считать $\rho = \text{const}$. Его дифференцирование дает

$$\operatorname{div} \mathbf{q} + [1 + (1 - S)m]\partial\theta / \partial t = \frac{M}{\rho V} \frac{\partial\varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} [1 - (1 - S)m]. \quad (24)$$

Запишем очевидное соотношение

$$V = [m(1 - S)]V + V_s + V_w. \quad (25)$$

Здесь V_w — объем воды в почвогрунте. За счет того, что вода заполняет поры среды не полностью и при деформировании такого грунта полного заполнения всех пор не происходит, мы можем считать, что $V_w + V_s = \text{const}$. Перепишем уравнение (25) в виде

$$[1 - m(1 - S)] = \frac{(V_s + V_w)}{V} = \left[\frac{(V_s + V_w)}{V_0} \right] (1 - \theta). \quad (26)$$

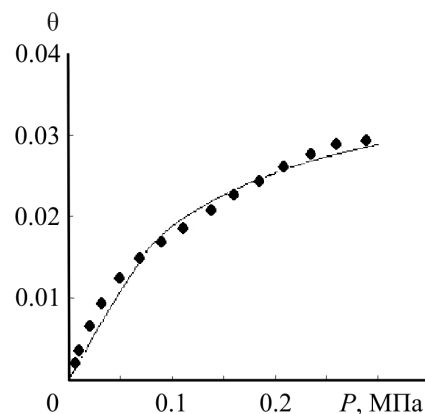
Интегрируя (24) с учетом условия недренируемости ненасыщенного грунта при его деформации, т. е. при $\mathbf{q} = 0$, и принимая во внимание (26), получаем

$$P = \left[\frac{(V_s + V_w)}{(2\beta_P V_s)} \right] \theta^2. \quad (27)$$

В работе [7] было получено решение аналогичной задачи для случая ненабухающих (например песчаных) почвогрунтов. Интересно, что полученное в [7] решение с точностью до множителя $(V_s + V_w)/V_s$ совпадает с (27). Поскольку множитель $(V_s + V_w)/V_s$, очевидно, больше единицы для набухающих почвогрунтов, соответствующая компрессионная кривая будет отлична от кривой в случае ненабухающего грунта при прочих равных условиях. Физически это объясняется тем, что в случае набухающего почвогрунта вода входит в состав как частиц (агрегатов) почвогрунта, так и транспортных пор, что находит отражение в появлении в (27) соответствующего множителя.

Расчеты, выполненные по уравнению (27), сравнивались с результатами экспериментов, выполненных в ходе серийных компрессионных испытаний ненасыщенных грунтов на одомере марки ГТ2.1.2 конструкции НПО "Геотек". Как можно видеть из рисунка, имеется хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными.

Зависимость усадки почвогрунта от компрессионной нагрузки на него: точки — эксперимент; сплошная линия — расчет



Заключение. Получено уравнение фильтрации в набухающих пористых средах, которое может быть использовано для количественного описания процессов, протекающих в средах, поры которых не полностью насыщены влагой (ненасыщенных пористых средах). Это уравнение представляет интерес для многих наук о Земле и для ряда технологий. Проанализировано поведение ненасыщенных набухающих пористых сред под нагрузкой. Получено уравнение, связывающее объемную деформацию среды с величиной приложенной к ней нагрузки. Проведено сравнение полученных результатов расчетов с экспериментальными данными, которое показало хорошее между ними соответствие.

Работа выполнена при государственной поддержке за счет субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров и для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-05-31271 мол_а).

Обозначения

j — переток жидкости из транспортных пор в условно твердую фазу грунта при набухании; m — объем транспортных пор почвы или грунта; m_c — объем воды в составе глинистой фракции почвогрунта; M_s — масса условно твердой фазы в представительном объеме; P — давление; \mathbf{q} — скорость фильтрации; s — общая влажность; S — водонасыщенность транспортных пор почвы или грунта (степень насыщения транспортных пор); \mathbf{V} — скорость движения флюида в почве или грунте; V_s^0 и V — начальный объем твердой фазы и объем представительного элемента пористой среды в представительном объеме соответственно; V_w — объем воды в почвогрунте; \mathbf{W} — скорость движения вещества твердой фазы; β_P — сжимаемость материала грунта под действием нагрузки P ; θ — коэффициент объемного расширения; ρ — плотность флюида; ρ_s — плотность вещества твердой фазы. Индексы: с — глина; s — твердая фаза; w — вода; 0 — значение параметра в начальный момент времени.

Литература

1. Флорин В. Ф. *Основы механики грунтов*. Ленинград–Москва: Госстройиздат, 1961.
2. Mitchell J. K. *Fundamentals of Soil Behavior*. New York: Wiley, 1983.
3. Лазаренко Е. К. *Курс минералогии*. Москва: Высшая школа, 1963.
4. Седов Л. И. *Механика сплошной среды*. Москва: Наука, 1973.
5. Храмченков М. Г., Храмченкова Р. Х. Теоретические основы гидрофизики набухающих почв. *Георесурсы*. 2006. Вып. 1(18). С. 17–20.
6. Костерин А. В. Модели и задачи механики насыщенных пористых сред: в *На рубеже веков. НИИ математики и механики Казанского университета. 1998–2002 гг.* Казань: Изд-во Казан. матем. об-ва, 2003. С. 310–318.
7. Галиуллина Н. Е., Храмченков М. Г., Храмченков Э. М., Чекалин А. Н., Михайлов В. В. О некоторых особенностях моделей механики многофазных грунтов. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов*. 2011. Вып. 3. С. 45–51.