

УДК 532.51

ВЛИЯНИЕ МАКСИМУМА ПЛОТНОСТИ ВОДЫ НА ОХЛАЖДЕНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

О. А. Симонов, Л. Н. Филимонова^{*,**}

Тюменский научный центр СО РАН, 625026 Тюмень, Россия

* Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 625026 Тюмень, Россия

** Тюменский государственный университет, 625003 Тюмень, Россия
E-mails: s_o_a@ikz.ru, filimonovaln@mail.ru

Численно исследован процесс охлаждения водонасыщенной пористой среды в цилиндрическом теплоизолированном сосуде с вертикальным охлаждающим элементом. Проведена оценка влияния конвективного теплопереноса на процесс охлаждения насыщенной водой пористой среды с учетом инверсии плотности при различных значениях проницаемости пористой среды. Показано, что при конвективном движении воды в пористых средах в окрестности нулевой температуры необходимо учитывать влияние максимума плотности воды. Наличие максимума плотности воды в высокопроницаемых грунтах приводит к перестройке течения, уменьшению скорости конвективного переноса, что обуславливает более медленное охлаждение системы.

Ключевые слова: пористая среда, свободная конвекция, максимум плотности воды.

DOI: 10.15372/PMTF20210407

Введение. При проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений (зданий, скважин, трубопроводов, дорог и пр.) в арктических и субарктических районах необходимо учитывать процессы промерзания и протаивания грунтов, что особенно актуально для областей распространения многолетнемерзлых пород, от состояния которых зависит безопасность эксплуатации техногенных объектов. Для обеспечения устойчивости грунтов используются различные инженерные методы [1]. Для охлаждения грунта под опорами сооружений (под всем сооружением) тепло отводится из грунта с помощью труб, заполненных различными теплоносителями. Верхний слой грунта (обычно высокопористый песок), подстилаемый многолетнемерзлыми породами, в теплое время года оттаивает и образует переувлажненный слой породы. В грунте возникают конвективные течения жидкости, которые оказывают существенное воздействие на тепломассоперенос. Вследствие сложности исследования конвективных течений непосредственно в эксперименте применяются различные математические модели, основанные на законах тепломассопереноса в водонасыщенных пористых средах.

Первые исследования тепловой устойчивости конвективных течений в изотропных пористых средах проведены в работах [2–4]. Получены данные о потере устойчивости и формировании конвективных режимов, определены критические значения температуры, при

Постановка задачи выполнена в рамках государственного задания на 2021–2030 гг. (№ ЕГИСУ НИОКТР 121041600041-0), вычислительные эксперименты и анализ результатов численного исследования выполнены в рамках государственного задания (№ 121030500156-6).

которых система теряет устойчивость и возникают конвективные течения. Задачи о конвективных течениях в неоднородных пористых средах решались в работах [5–7]. В работе [8] проведен анализ влияния анизотропной проницаемости на конвективные течения.

Вместе с тем недостаточное внимание уделяется изучению влияния инверсии плотности воды на конвективные течения в пористых средах. Известно, что при атмосферном давлении максимальная плотность воды ($999,972 \text{ кг/м}^3$) наблюдается при температуре, равной $3,984 \text{ }^\circ\text{C}$ [9]. Это явление оказывает влияние на структуру фильтрационного течения и на скорость теплопереноса. При некоторых условиях холодная жидкость начинает подниматься, охлаждая верхние слои пористой среды, что приводит к изменению процесса теплопереноса, возникновению гидродинамической неустойчивости [9, 10].

Целью настоящей работы является исследование в численном эксперименте влияния инверсии плотности воды на теплоперенос во влагонасыщенной пористой среде в окрестности вертикально расположенной трубы охлаждающего устройства.

1. Математическая модель. Рассмотрим пористую среду, в которой находится вертикально расположенный цилиндрический охлаждающий элемент радиусом r . Моделируемая система показана на рис. 1. Под водонасыщенным высокопористым слоем грунта находятся гидравлически непроницаемые (многолетнемерзлые) породы. Температура охлаждающего элемента постоянна и равна $0 \text{ }^\circ\text{C}$. В численном эксперименте моделировалось движение воды и контролировалось изменение температуры в водонасыщенном песке.

При наличии градиента температуры в водонасыщенной пористой среде возможны два механизма переноса тепла: конвективный (внутренняя энергия переносится движущейся жидкостью) и кондуктивный (энергия переносится за счет теплопроводности). Степень влияния каждого из этих механизмов определяется структурой породы, размером пор, их расположением, степенью сообщаемости пор, свойствами вещества, заполняющего поровое пространство [11].

Для описания движения жидкости в пористой среде обычно используется линейный закон Дарси либо приближения Бринкмана и Форхгеймера.

Закон Дарси применим для ньютоновских жидкостей при малых скоростях фильтрации, когда силы инерции очень малы и ими можно пренебречь [12]. При больших скоростях фильтрации или высокой пористости линейный закон неприменим вследствие существенного влияния инерционных эффектов, что, в частности, может привести к отрыву потока от поверхности твердого скелета [13], при этом зависимость давления от скорости становится нелинейной. В данном случае целесообразно использовать закон Форхгеймера [14], в котором учитываются инерционные эффекты (инерционная составляющая сопротивления движению жидкости). В модели Форхгеймера принимается квадратичная зависимость градиента давления от скорости фильтрации [15].

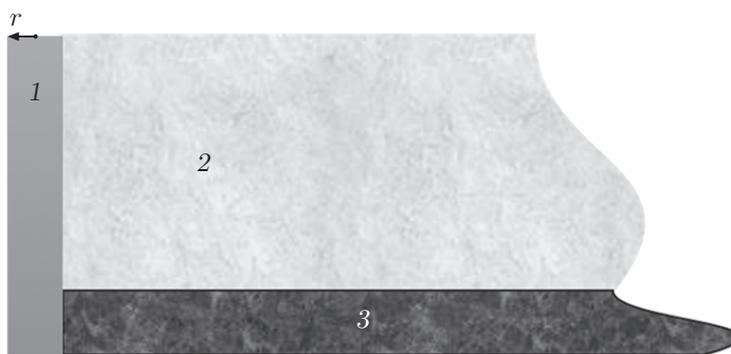


Рис. 1. Схема численного эксперимента:

1 — термостабилизатор, 2 — водонасыщенный песок, 3 — многолетнемерзлая порода

Для учета сдвигового сопротивления движению жидкости, вызванного наличием пористого каркаса, используется уравнение Бринкмана [16]. В уравнении движения появляется дополнительное слагаемое, которое необходимо при больших значениях пористости, а также в случаях, когда на границе контакта пористых и непористых сред принимаются условия прилипания. Это слагаемое необходимо для описания пограничного слоя, возникающего в пористой среде. Кроме того, модель Бринкмана используется для описания структуры пористого пространства, в котором размеры частиц твердой фазы имеют порядок 3η (η — характерное расстояние между соседними частицами). Для более спрессованных частиц, характерный размер которых больше 3η , фильтрация удовлетворительно описывается законом Дарси; для частиц, порядок размеров которых меньше 3η , фильтрация может быть описана с использованием полных уравнений Навье — Стокса [15]. Таким образом, приближение Бринкмана позволяет моделировать структуру поля скорости в вязком пограничном слое в пористой среде. В работе [13] проведено сравнение моделей пористой среды Дарси и Бринкмана в приближении Буссинеска, которое учитывает зависимость плотности жидкости от температуры. Показано, что применение модели Дарси — Буссинеска приводит к завышению скорости движения жидкости по сравнению с моделью Бринкмана — Буссинеска, а также к более интенсивному охлаждению анализируемого объекта. Таким образом, модель Дарси — Буссинеска не может быть применена, в случае если инерционные силы одного порядка с вязкими силами.

С учетом сказанного выше при моделировании конвекции в высокопроницаемой водонасыщенной пористой среде вблизи охлаждающего элемента более целесообразно применять модель Бринкмана — Буссинеска.

Система уравнений, описывающих конвективные течения в пористой среде, в приближении Бринкмана — Буссинеска имеет вид

$$\frac{\rho_w}{m} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{m} (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \frac{\mu}{m} \Delta \mathbf{u} - \frac{\mu}{k} \mathbf{u}; \quad (1)$$

$$\nabla \mathbf{u} = 0; \quad (2)$$

$$(\rho C)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + m \rho_w C_w \mathbf{u} \cdot \nabla T - \lambda \Delta T = \mathbf{q}, \quad (3)$$

где \mathbf{u} — скорость фильтрации, м/с; t — время, с; p — давление жидкости, Па; k — проницаемость пористой среды, м²; μ — динамическая вязкость жидкости, Па · с; T — температура, К; \mathbf{g} — ускорение свободного падения, м/с²; $\lambda = m\lambda_w + (1-m)\lambda_s$ — эффективный коэффициент теплопроводности, Дж/(м · с · К); λ_w, λ_s — коэффициент теплопроводности воды и скелета соответственно, Дж/(м · с · К); m — пористость; $(\rho C)_{eff} = m\rho_w C_w + (1-m)\rho_s C_s$ — эффективный коэффициент теплосодержания насыщенной пористой среды, Дж/(м³ · К); ρ_w, ρ_s — плотность воды и скелета, кг/м³; C_w, C_s — теплоемкость воды и скелета, Дж/(кг · К); \mathbf{q} — тепловой поток, Дж/(м³ · с).

Для определения безразмерных параметров, характеризующих структуру течения, преобразуем уравнение (3), разделив каждое слагаемое в нем на величину $(\rho C)_{eff}$ и обозначив через $\chi = \lambda/(\rho C)_{eff}$ коэффициент температуропроводности. В результате получаем

$$\frac{\partial T}{\partial t} + m \frac{\rho_w C_w}{(\rho C)_{eff}} \mathbf{u} \cdot \nabla T - \chi \Delta T = \frac{\mathbf{q}}{(\rho C)_{eff}}. \quad (4)$$

В (4) второе слагаемое появляется вследствие изменения температурного поля, вызванного конвективным движением воды, третье слагаемое — вследствие изменения температурного поля за счет теплопроводности. Отношение этих слагаемых определяет режим в пористой среде.

Используя (4), введем безразмерный параметр α (аналог числа Рэлея), равный отношению изменения температуры за счет молекулярной теплопроводности к изменению температуры за счет конвекции:

$$\alpha = \frac{\rho_w C_w m u_h h}{(\rho C)_{eff} \chi}. \tag{5}$$

Здесь h — характерный размер (высота охлаждающего элемента), м; u_h — характерная скорость фильтрации жидкости, м/с.

Характерную скорость фильтрации жидкости в (5) оценим с учетом того, что перепад температур приводит к перепаду плотностей, вследствие чего возникает перепад давления, вызывающий конвективное течение. Перепад давления связан со скоростью течения законом Дарси:

$$u_h = \frac{k \Delta P}{\mu h} = \frac{k(\rho - \rho_0)gh}{\mu h} = \frac{kg}{\nu} \frac{\rho - \rho_0}{\rho_w}. \tag{6}$$

Здесь ΔP — перепад давления, Па; $\rho - \rho_0$ — характерная разность максимального и минимального значений плотности воды, кг/м³; ν — кинематическая вязкость воды, м²/с. Поскольку исследуется влияние инверсии плотности воды, в качестве ρ_0 примем плотность воды при нулевой температуре. Следовательно, $\Delta\rho = 0,129$. С учетом (6) получаем

$$\alpha = \frac{(\rho - \rho_0)C_w}{(\rho C)_{eff}} \frac{m k g h}{\nu \chi}. \tag{7}$$

С использованием (7) можно оценить значение параметра α . Если $\alpha < 1$, то скорость конвективного переноса тепла меньше скорости переноса тепла за счет молекулярной теплопроводности; если $\alpha \approx 1$, то перенос тепла за счет конвекции сопоставим с переносом тепла за счет молекулярной теплопроводности; если $\alpha > 1$, то конвекция играет определяющую роль в изменении температуры пористой среды.

2. Численный эксперимент. Численное решение строится в конечной области радиусом $R = 2h$ (рис. 2). Выбор такой области обусловлен тем, что, вообще говоря, движение возникает во всем объеме жидкости. Вдоль охлаждающего элемента в пористой среде возникает достаточно тонкий пограничный слой, в котором движется жидкость, например, холодная вода опускается вдоль стенки охлаждающего элемента, достигает дна цилиндра и оттесняет воду вдоль дна цилиндра в бесконечность, а в верхней части цилиндра жидкость “всасывается” из бесконечности в пограничный слой. Вследствие этого распределение температуры по высоте становится неравномерным. По мере удаления от центра

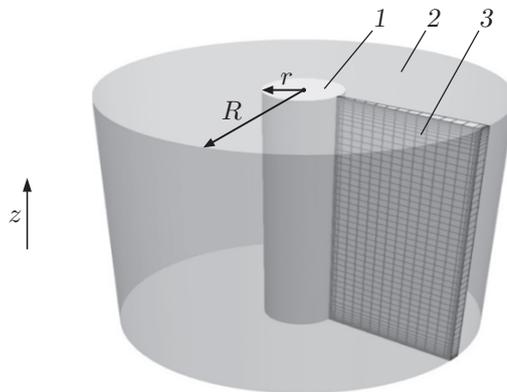


Рис. 2. Геометрия расчетной области:

1 — охлаждающий стержень, 2 — верхняя граница расчетной области, 3 — расчетная сетка

Значения коэффициентов для полиномиальной интерполяции физических характеристик скелета пористой среды

Зависимость	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
$\rho(T)$	1354,21	0,043 035 77	$-1,137 786 \cdot 10^{-4}$	$3,453 539 \cdot 10^{-8}$	0	0
$C_p(T)$	115,3022	3,063 043	$-0,003 472 486$	$1,817 176 \cdot 10^{-6}$	$-3,515 478 \cdot 10^{-10}$	0
$\lambda(T)$	0,149 845 8	0,005 193 887	$-1,138 604 \cdot 10^{-5}$	$1,017 063 \cdot 10^{-8}$	$-4,122 789 \cdot 10^{-12}$	$6,547 539 \cdot 10^{-16}$

за счет теплового обмена эта неоднородность сглаживается и на расстоянии, большем высоты расчетной области, становится несущественной. Кроме того, движение происходит в цилиндрической области, вследствие чего радиальная составляющая скорости обратно пропорциональна расстоянию от центра, при этом в соответствии с (5) параметр α быстро уменьшается и влияние конвективного теплопереноса становится пренебрежимо малым. Для проверки обоснованности этих допущений выполнены расчеты при различных значениях R . Установлено, что при $R > 2h$ характеристики течения вблизи охлаждающего элемента (распределения скоростей и температур) существенно не меняются.

Численное моделирование проводилось методом конечных объемов с использованием вычислительного пакета OpenFOAM. Задача является радиально-симметричной, поэтому расчеты проводились в одном секторе с углом раствора, равным 1° (см. рис. 2). В расчетах использовалась прямоугольная сетка, состоящая из 4000 элементов, расчетная область имела размеры $0,10 \times 0,04$ м. Проверка сходимости выполнена с помощью методики, описанной в [10].

Конвективное течение воды в пористой среде моделировалось в цилиндрическом сосуде радиусом $R = 0,2$ м и высотой $h = 0,1$ м. В центре цилиндра размещен вертикальный охлаждающий элемент радиусом $r = 0,01$ м (см. рис. 2). Решалась полная система уравнений (1)–(3).

Для описания характеристик пористой среды использована упрощенная математическая модель: горная порода состоит из регулярных упаковок непересекающихся сфер. При кубическом типе упаковки сфер пористость такой среды равна 0,4764 [17].

Для описания зависимости плотности ρ , теплоемкости C_p и теплопроводности λ скелета пористой среды и воды от температуры использовались полиномиальные интерполяции (см. таблицу):

$$f(T) = c_0 + c_1T + c_2T^2 + c_3T^3 + c_4T^4 + c_5T^5.$$

Для описания зависимости плотности, вязкости, теплоемкости и теплопроводности воды от температуры использовались те же полиномиальные интерполяции, что и в работе [10].

Начальная температура насыщенной водой горной породы принималась равной 283 К. Температура охлаждающего стержня в течение 30 с уменьшалась по линейному закону до значения, равного 273 К.

Все стенки сосуда (кроме охлаждающего стержня) теплоизолированы. На боковых стенках сосуда принимались граничные условия проскальзывания жидкости. В момент времени $t = 0$ скорость конвективного течения была равна нулю.

3. Результаты исследования и их обсуждение. Ниже приводятся и анализируются результаты численного решения.

3.1. *Конвективное течение воды в высокопроницаемых ($\alpha \gg 1$) грунтах.* Результаты численного эксперимента показывают, что в процессе конвективного течения воды в

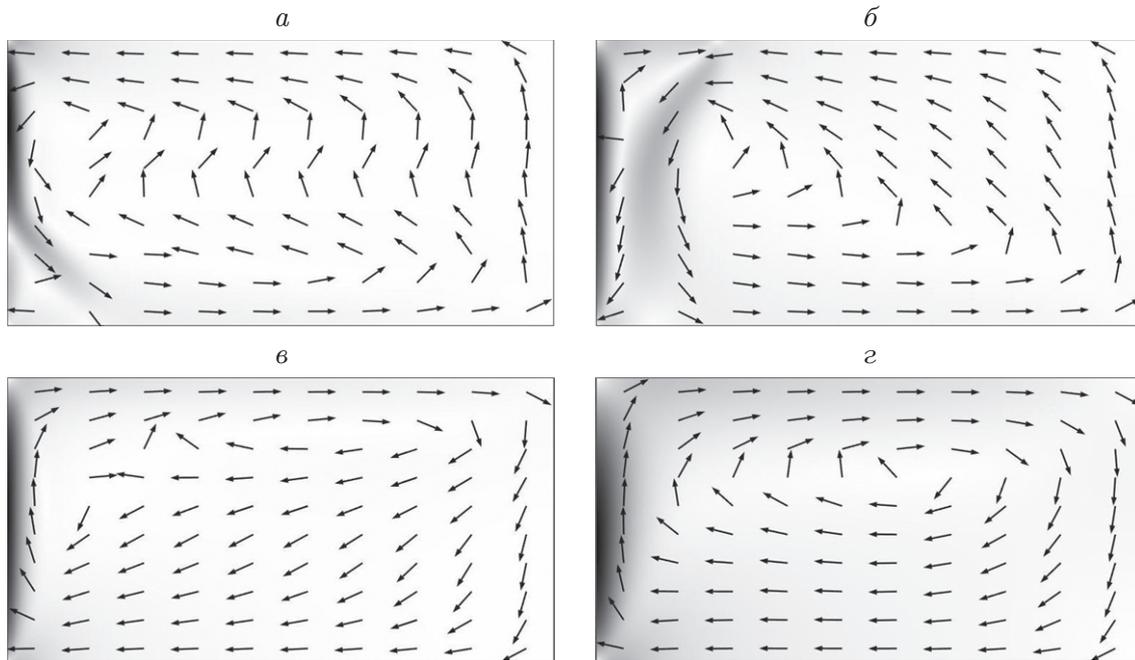


Рис. 3. Поле скоростей течения при охлаждении пористой среды при $\alpha = 1248$ ($k = 10^{-5} \text{ м}^2$) в различные моменты времени с учетом наличия максимума плотности воды:
a — $t = 50$ мин, *б* — $t = 200$ мин, *в* — $t = 500$ мин, *г* — $t = 2000$ мин

пористой среде с высокой проницаемостью ($k = 10^{-5} \text{ м}^2$) при $\alpha = 1248$ можно выделить ряд характерных стадий.

Сначала возникает нисходящее течение вдоль стенки охлаждающего элемента, затем холодная вода распространяется вдоль дна сосуда и накапливается в его нижней части. В точке соприкосновения дна сосуда с охлаждающим элементом формируется область низких температур, в которой достаточно быстро температура становится ниже температуры, при которой плотность воды максимальна, что приводит к возникновению восходящего потока (рис. 3, *a*). Восходящий поток оттесняет нисходящий конвективный поток от охлаждающего элемента, при этом толщина температурного пограничного слоя увеличивается, градиенты температуры и скорость теплообмена уменьшаются. По мере охлаждения воды область, в которой нисходящий поток оттесняется от охлаждающего элемента восходящим потоком, увеличивается, точка соприкосновения потоков перемещается вверх (рис. 3, *б*). Достигнув поверхности, более легкая холодная вода распространяется по ней, занимая верхнюю часть сосуда и оттесняя нисходящий поток вниз до его полного исчезновения (рис. 3, *в*). Вдоль охлаждающего элемента формируется восходящий конвективный поток. Такой режим течения сохраняется вплоть до полного охлаждения воды в сосуде (рис. 3, *г*). С течением времени градиенты температур постепенно уменьшаются, течение прекращается.

Интенсивный конвективный перенос и перестройка течения приводят к анизотропному распределению температуры по высоте охлаждаемого сосуда. На рис. 4 приведены зависимости температуры от высоты сосуда, рассчитанные при $R = 0,025; 0,050$ м для тех же моментов времени, что и поля скоростей на рис. 3.

Температурные распределения с положительным градиентом температуры соответствуют нисходящему течению с отрицательным градиентом температуры. Немонотонное

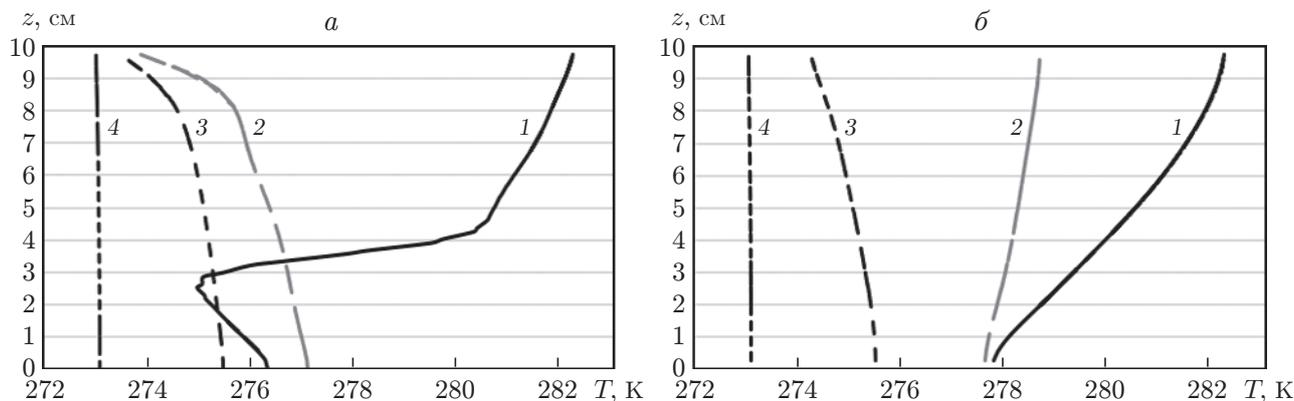


Рис. 4. Распределение температуры по высоте сосуда при различных значениях радиуса R :

a — $R = 0,025$ м, b — $R = 0,05$ м; 1 — $t = 50$ мин, 2 — $t = 200$ мин, 3 — $t = 500$ мин, 4 — $t = 2000$ мин

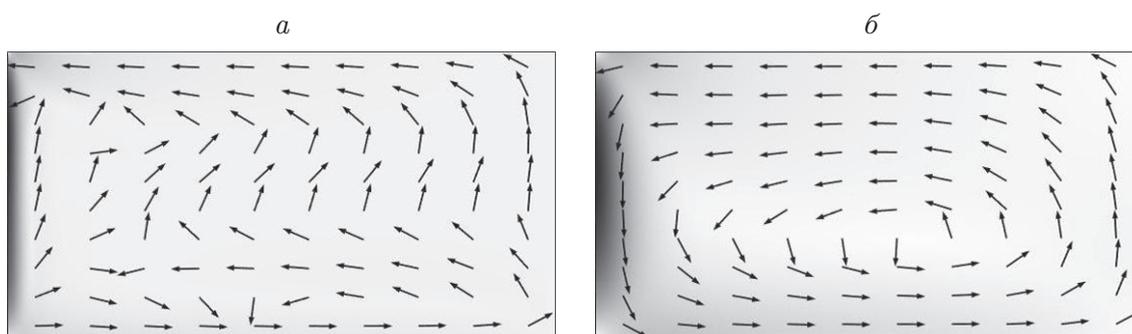


Рис. 5. Поле скоростей течения при охлаждении пористой среды при $\alpha = 1248$ ($k = 10^{-5}$ м²) в различные моменты времени без учета наличия максимума плотности воды:

a — $t = 200$ мин, b — $t = 2000$ мин

изменение температуры обусловлено перестройкой течения, когда холодный восходящий поток постепенно оттесняет нисходящий поток от охлаждающего элемента. В близкой к охлаждающему элементу области (см. рис. 4, a) в верхней части сосуда температура достаточно быстро становится близкой к 0 °С (273 К), с течением времени градиенты уменьшаются за счет постепенного охлаждения потока в придонной области. На некотором расстоянии от центра сосуда (см. рис. 4, b) вблизи его дна температура достаточно быстро достигает значений, близких к температуре, при которой плотность воды максимальна, и в течение длительного времени остается неизменной. Дальнейшее уменьшение температуры в этой области происходит после перестройки течения.

Характер конвективного течения становится более простым, если не учитывать наличие максимума плотности у воды. В пористой среде возникает нисходящее конвективное течение воды вдоль стенки (границы) охлаждающего элемента, холодная вода распространяется вдоль дна сосуда, накапливаясь в его нижней части (рис. 5, a). Постепенно в движение вовлекается вся жидкость в сосуде, после чего картина течения существенно не меняется вплоть до полного охлаждения пористой среды (рис. 5, b). С течением времени пористая среда охлаждается, градиенты температур постепенно уменьшаются, течение прекращается.

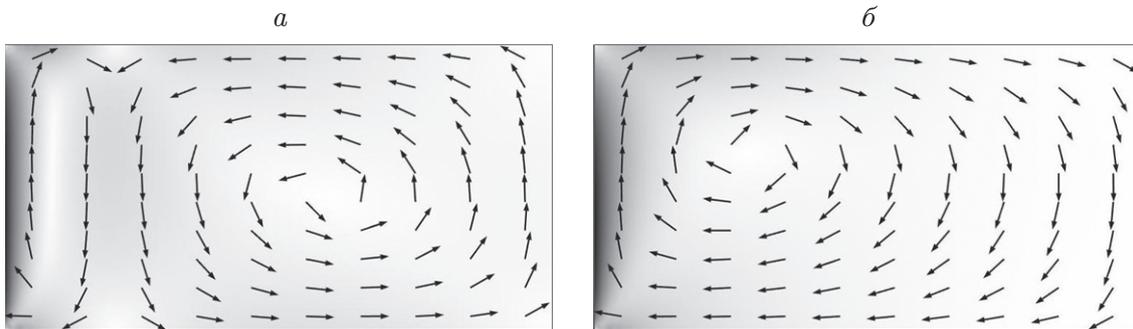


Рис. 6. Поле скоростей течения при охлаждении пористой среды при $\alpha = 12,48$ ($k = 10^{-7} \text{ м}^2$) в различные моменты времени с учетом наличия максимума плотности воды:
 а — $t = 1000$ мин, б — $t = 2000$ мин

3.2. *Конвективное течение воды в среднепроницаемых ($\alpha \approx 1$) грунтах.* Расчеты, проведенные при $\alpha = 12,48$ для пористой среды с проницаемостью 10^{-7} м^2 , показывают, что в пористой среде со средней проницаемостью ($\alpha \approx 1$) картина течения незначительно отличается от картины конвективного течения в высокопроницаемой пористой среде. Так же происходит перестройка течения с нисходящего на восходящее.

В отличие от конвективного течения в высокопроницаемых пористых средах в условиях проведенного численного эксперимента в моделируемом сосуде в течение длительного времени одновременно сохраняются два потока: нисходящий и восходящий (рис. 6,а). Эти потоки имеют вертикальную линию соприкосновения, которая постепенно сдвигается от стенки охлаждающего элемента к границе области (рис. 6,б). Затем устанавливается режим с восходящим вдоль охлаждающего элемента течением.

Для оценки влияния наличия максимума плотности воды на процесс охлаждения пористой среды выполнены расчеты, в которых наличие максимума плотности воды не учитывалось. В этом случае картина течения подобна картине течения, приведенной на рис. 5. В пористой среде образуется нисходящий вдоль охлаждающего элемента поток, затухающий по мере охлаждения среды.

3.3. *Конвективное течение воды в низкопроницаемых ($\alpha \ll 1$) грунтах.* При $\alpha = 0,0001248$ (низкопроницаемая пористая среда с $k = 10^{-12} \text{ м}^2$) теплоперенос обусловлен в основном теплофизическими свойствами скелета и воды, вследствие чего конвективное течение становится симметричным относительно горизонтальной линии, расположенной на высоте, равной половине высоты сосуда. Изменения температуры по вертикали не происходит. Однако общий характер течения такой же, как в описанных выше случаях: вблизи охлаждающего элемента течение меняет направление, в пористой среде одновременно существуют как восходящее, так и нисходящее течения с вертикальной линией соприкосновения потоков, которая медленно движется в направлении внешней границы расчетной области (рис. 7).

Если не учитывать наличие у воды максимума плотности, то возникающее при этом конвективное течение, как и в описанных выше случаях, является нисходящим вблизи охлаждающего элемента, при этом оно симметрично относительно центральной горизонтальной линии.

3.4. *Влияние максимума плотности воды на охлаждение водонасыщенной пористой среды.* Для оценки влияния максимума плотности воды на скорость охлаждения водонасыщенной пористой среды рассчитывались зависимости средней температуры в расчетной области от времени для трех описанных выше случаев. Результаты расчета приведены

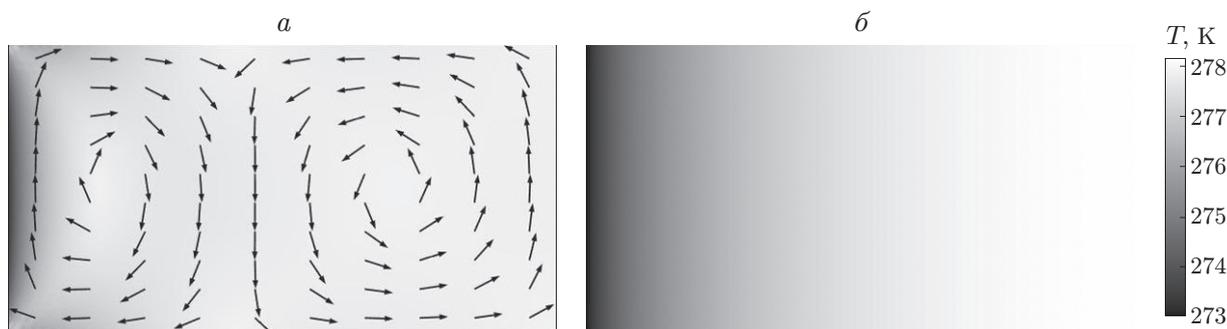


Рис. 7. Поля скоростей течения (*a*) и температуры (*б*) при охлаждении пористой среды при $\alpha = 0,000\,124\,8$ ($k = 10^{-12}$ м²) в момент времени $t = 2000$ мин с учетом наличия максимума плотности воды

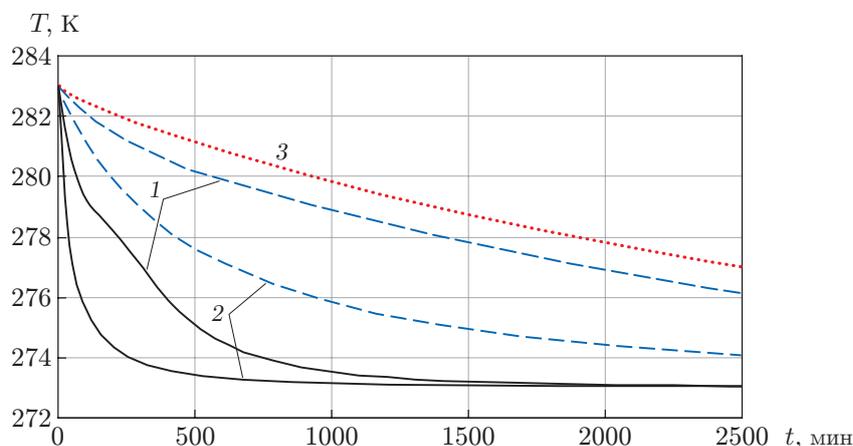


Рис. 8. Зависимость средней температуры охлаждаемой пористой среды от времени:

сплошные линии — $\alpha = 1248$ ($k = 10^{-5}$ м²), штриховые — $\alpha = 12,48$ ($k = 10^{-7}$ м²);
 1 — с учетом наличия максимума плотности воды, 2 — без учета наличия максимума плотности воды, 3 — в отсутствие конвективного переноса

на рис. 8. Там же представлены результаты расчета, в котором не учитывалось движение воды в пористой среде. В высокопроницаемых грунтах ($\alpha \gg 1$) влияние конвективного переноса на процессы теплообмена существенно: именно фильтрационное течение жидкости охлаждает скелет. Следует отметить, что средняя температура изменяется немонотонно вследствие перестройки течения. Расчеты, проведенные для воды без учета наличия у нее максимума плотности, показывают, что в этом случае скорость охлаждения системы еще выше: пористая среда охлаждается в три раза быстрее.

В среднепроницаемых грунтах ($\alpha \approx 1$) при учете наличия максимума плотности воды охлаждение системы происходит значительно медленнее, инверсия течения приводит к тому, что влияние конвективного переноса уменьшается, отличие средней температуры от температуры, вычисленной без учета конвективного течения, менее существенно, чем ее отличие от температуры, вычисленной без учета наличия максимума плотности у воды. Результаты теплофизического расчета, проведенного без учета гидродинамической составляющей, обусловленной наличием максимума плотности воды, значительно точнее результатов расчета, выполненного с использованием упрощенной модели воды с учетом конвективного переноса.

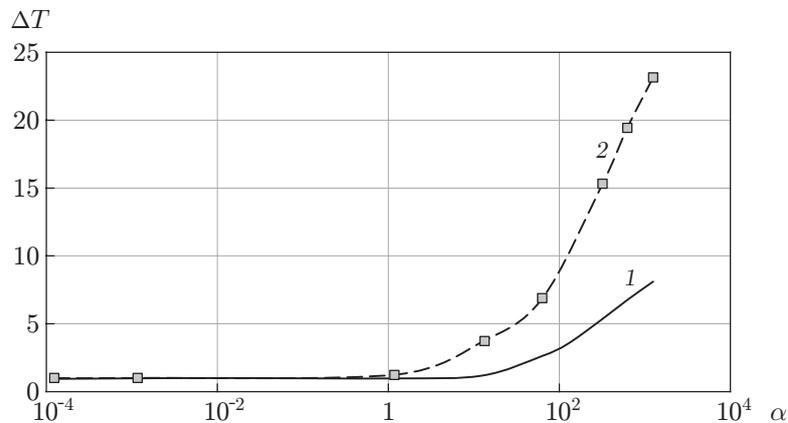


Рис. 9. Зависимость средней скорости охлаждения пористой среды от параметра α :
 1 — с учетом наличия максимума плотности воды, 2 — без учета наличия максимума плотности воды

При малых значениях α ($k = 10^{-12} \text{ м}^2$) для трех описанных выше вариантов расчета кривые практически совпадают, влияние конвективного переноса на процесс охлаждения незначительно.

При анализе зависимости скорости охлаждения ΔT от проницаемости (параметра α) с использованием зависимостей средней температуры от времени была вычислена скорость охлаждения при температуре, близкой к температуре, при которой плотность воды максимальна (277 K) (рис. 9). На рис. 9 приведены также результаты расчетов, в которых инверсия плотности не учитывалась. Скорости обезразмерены на скорость, рассчитанную без учета конвекции. Данные представлены в логарифмическом масштабе.

Из рис. 9 следует, что параметр α оказывает существенное влияние на режимы конвективного течения в пористой среде, но в случае наличия максимума плотности у воды влияние конвекции является значительным при большей проницаемости пористой среды. Действительно, при $\alpha < 1$ значения скорости охлаждения различаются незначительно при любых принятых в расчетах допущениях. При $\alpha \approx 1$ результаты расчетов по модели, в которых не учитывается наличие максимума плотности, будут ошибочными. Вследствие перестройки течения влияние конвекции на процесс охлаждения системы существенно только в том случае, если $\alpha > 10$. Следует отметить, что в высокопроницаемых грунтах значения скорости охлаждения системы в решениях с учетом и без учета наличия максимума плотности пропорциональны и их зависимости от параметра α одинаковы. Это обусловлено тем, что перестройка течения приводит к замедлению процесса конвективного теплообмена, на этом интервале времени система охлаждается за счет кондуктивного переноса, затем устанавливается режим восходящего течения. В рамках принятой модели процесс переноса тепла от пористой среды к охлаждающему элементу не зависит от направления течения, а поскольку градиенты температуры при учете наличия максимума плотности воды меньше, скорость охлаждения в этом случае также меньше.

Заключение. Из результатов выполненных расчетов следует, что при описании низкопроницаемых грунтов можно не учитывать конвективное движение и использовать простые модели, но при решении задачи о распространении какой-либо примеси конвективное течение необходимо учитывать.

Наличие максимума плотности у воды в задачах с градиентами температур в области температур, близких к нулю, приводит к перестройке конвективного течения. В рассматриваемом случае скорость нисходящего течения уменьшается и возникают восходящие

потоки холодной воды. Уменьшение скорости конвективных потоков в момент перестройки течения приводит к замедлению процесса охлаждения системы.

Из полученных данных следует, что при выборе метода решения задач о тепломассопереносе в водонасыщенных пористых средах при температуре, близкой к нулю, необходимо оценить характерные параметры системы и вычислить параметр α . В случае если этот параметр меньше единицы, можно провести расчет без учета конвективных потоков. В остальных случаях необходимо проводить расчет с учетом конвекции и использовать модель воды, учитывающую наличие максимума плотности. Если не учитывать эту особенность, то интегральные параметры среды будут определяться с большой погрешностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ухов С. Б.** Механика грунтов, основания и фундаменты: Учеб. пособие. 4-е изд., стер. / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский и др. М.: Высш. шк., 2007.
2. **Horton C. W., Rogers F. T. (Jr)** Convection currents in a porous medium // *J. Appl. Phys.* 1945. V. 16, N 6. P. 367–370. DOI: 10.1063/1.1707601.
3. **Lapwood E. R.** Convection of a fluid in a porous medium // *Proc. Cambridge.* 1948. V. 44, N 4. P. 508–521. DOI: 10.1017/S030500410002452X.
4. **Katto Y., Matsuoka T.** Criterion for onset of convective flow in a fluid in a porous medium // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 1967. V. 10, N 3. P. 297–309. DOI: 10.1016/0017-9310(67)90147-0.
5. **Capone F., Gentile M., Hill A. A.** Penetrative convection in anisotropic porous media with variable permeability // *Acta Mech.* 2011. V. 216, N 1–4. P. 49–58. DOI: 10.1007/s00707-010-0353-2.
6. **Harfash A. J., Hill A. A.** Simulation of three dimensional double-diffusive throughflow in internally heated anisotropic porous media // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2014. V. 72. P. 609–615. DOI: 10.1016/j2014.01.048.
7. **Rees D. A. S., Storesletten L., Postelnicu A.** The onset of convection in an inclined anisotropic porous layer with oblique principle axes // *Transport Porous Media.* 2006. V. 62, N 2. P. 139–156. DOI: 10.1007/s11242-005-0618-8.
8. **Castinel G., Combarous M.** Critere d'apparition de la convection naturelle dans une couche poreuse anisotrope horizontale // *C. R. Acad. Sci. B.* 1974. V. 278. P. 701–704.
9. **Anselmi C., De Paz M., Marciano A., et al.** Free convection experiments in water and deuterated mixtures at temperatures including the density maxima // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 1990. V. 33, N 11. P. 2519–2524. DOI: 10.1016/0017-9310(90)90009-J.
10. **Симонов О. А., Филимонова Л. Н.** Численное исследование влияния поверхностного натяжения на структуру течения в цилиндрическом сосуде с учетом максимума плотности воды // *Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика.* 2019. Т. 5, № 3. С. 131–146. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-131-146.
11. **Бабаев В. В.** Теплофизические свойства горных пород / В. В. Бабаев, В. Ф. Будымка, Т. А. Сергеева и др. М.: Недра, 1987.
12. **Басниев К. С.** Подземная гидромеханика / К. С. Басниев, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. М.: Недра, 1993.
13. **Трифоновна Т. А., Шеремет М. А.** Сравнительный анализ моделей Дарси и Бринкмана при исследовании нестационарных режимов сопряженной естественной конвекции в пористой цилиндрической области // *Компьютер. исслед. и моделирование.* 2013. Т. 5, № 4. С. 623–634. DOI: 10.20537/2076-7633-2013-5-4-623-634.

14. **Nield D. A.** Convection in porous media. 3rd ed. / D. A. Nield, A. Bejan. N. Y.: Springer, 2006.
15. **Леонтьев Н. Е.** Основы теории фильтрации. М.: Изд-во Центра приклад. исслед. при мех.-мат. фак. Моск. гос. ун-та, 2009.
16. **Brinkman H. C.** A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles // Appl. Sci. Res. 1949. V. 1. P. 27–34. DOI: 10.1007/BF02120313.
17. **Игошин Д. Е., Сабуров Р. С.** Численное исследование зависимости проницаемости от пористой среды, образованной каналами регулярной структуры // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1, № 1. С. 84–90.

*Поступила в редакцию 9/III 2021 г.,
после доработки — 18/III 2021 г.
Принята к публикации 29/III 2021 г.*
