

УДК 532.54:532.6

ОСОБЕННОСТИ ВПИТЫВАНИЯ МИКРОКАПЕЛЬ ДВУХСЛОЙНЫМИ ПОРИСТЫМИ СРЕДАМИ

Ю. Д. Варламов, Ю. П. Мещеряков*,
М. Р. Предтеченский, С. Н. Ульянов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

* Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: varlamov@itp.nsc.ru

Теоретически и экспериментально исследовано впитывание микрокапель двухслойными пористыми средами. Представлена и верифицирована двумерная модель перетекания жидкости из капли в пористую среду, основанная на совместном численном решении уравнений Эйлера с учетом сил поверхностного натяжения и уравнения нестационарной фильтрации. Приведены результаты анализа влияния структурных параметров двухслойной пористой среды (размера пор в слоях, их пористости и толщины) на впитывание капель. Показано, что наличие второго слоя может оказать существенное влияние на скорость впитывания капель и характер распределения жидкости в среде. Установлено, что размер пор является доминирующим параметром, определяющим влияние второго слоя.

Ключевые слова: микрокапли, пористые среды, впитывание.

Введение. В последнее время при исследовании различных аспектов транспорта жидкости в пористых средах уделяется внимание изучению процесса впитывания малых по размеру капель жидкости одно- и многослойными пористыми средами [1–3]. Интерес к этой проблеме обусловлен развитием технологий высококачественной струйной печати [4, 5] и формирования покрытий [6].

Существенной особенностью впитывания капли жидкости является наличие свободной и контактной границ [4–9]. В этом случае процессы капиллярного растекания и стремления капли минимизировать свободную поверхность оказывают влияние на форму капли при впитывании, длительность и результат впитывания. В работе [7] предложена аналитическая модель, позволяющая описать процесс перетекания жидкости из капли в тонкий пористый слой. В [5] рассмотрена двумерная модель, в которой пористая среда представлена в виде чередующихся вертикальных щелей, что ограничивало движение жидкости только в вертикальном направлении. В работе [8] численно исследовано влияние проницаемости пористой среды на впитывание капли в случае двухслойных сред с одинаковым размером пор в слоях.

В данной работе представлена двумерная модель, в которой слои двухслойной пористой среды характеризуются эффективными коэффициентами проницаемости, зависящими от пористости и размера пор. Для описания движения жидкости в пористой среде использовались уравнения нестационарной фильтрации несжимаемой жидкости. Моделирование движения жидкости в капле, находящейся на поверхности пористой среды, основано на решении уравнений Эйлера для несжимаемой жидкости с учетом сил поверхностного натяжения. Корректность численных расчетов проверялась путем сопоставления с экспе-

риментальными данными по впитыванию капель пористыми средами. Проведен анализ влияния структурных параметров двухслойной пористой среды (размера пор в слоях, их пористости и толщины) на длительность впитывания капель и характер распределения жидкости в пористой среде.

1. Постановка задачи. Объектом исследования являлся процесс впитывания капель одно- и двухслойными пористыми средами с размером пор в верхнем слое, меньшим размера капель. Начальная форма капли задавалась в виде сферического сегмента. Дальнейшее изменение формы капли зависело от совокупности процессов: капиллярного растекания, стремления капли минимизировать свободную поверхность в результате действия сил поверхностного натяжения и собственно впитывания. Моделирование указанных процессов основывалось на совместном решении уравнений, описывающих движение жидкости в капле и в пористой среде.

1.1. *Уравнения движения жидкости.* Для описания движения жидкости в капле, находящейся на поверхности пористой среды, использовались уравнения динамики несжимаемой невязкой жидкости Эйлера и уравнение неразрывности [10], которые в приближении аксиальной симметрии имеют вид

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{v}{r} \quad (1)$$

(u, v — компоненты вектора скорости движения жидкости; p — давление; ρ — плотность жидкости).

Предполагается, что в пористой среде просочившаяся жидкость занимает сплошную область. Движение жидкости в порах является ламинарным, и для установившихся течений выполняется закон Дарси (полагается, что скорость движения жидкости в порах прямо пропорциональна градиенту давления) [2, 3]. Коэффициентом пропорциональности является коэффициент фильтрации $k = k_0/\eta$, который определяется коэффициентом проницаемости среды k_0 , зависящим от пористости ε и размера пор d , и динамической вязкостью жидкости η . Следуя работе [1], в которой рассмотрены экспериментальные данные по движению жидкости в пористых средах различной структуры, для определения коэффициента проницаемости использовано следующее выражение:

$$k_0 = d^2 \varepsilon^3 / [150(1 - \varepsilon)^2]. \quad (2)$$

В рамках указанных приближений движение жидкости в пористой среде описывалось уравнениями нестационарной фильтрации несжимаемой жидкости [2, 3], которые в случае аксиальной симметрии имеют вид

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{k} u, \quad \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{1}{k} v. \quad (3)$$

Здесь $d/dt = \partial/\partial t + (u \partial/\partial z + v \partial/\partial r)/\varepsilon$; u, v — компоненты вектора скорости фильтрации.

1.2. *Граничные условия.* На свободной поверхности капли ставились следующие граничные условия: отсутствие касательных напряжений и наличие скачка нормальных напряжений p_d , обусловленного действием капиллярных сил:

$$p_d = \sigma(1/R_1 + 1/R_2) \quad (4)$$

(σ — поверхностное натяжение; R_1, R_2 — главные радиусы кривизны поверхности капли).

На границе капля — пористая среда использовалось условие равенства нормальных компонент скорости движения жидкости в капле и пористой среде. На свободной границе пористой среды, занятой просочившейся жидкостью, ставилось условие непротекания — равенство нулю нормальной компоненты скорости движения жидкости в пористой среде.

Действие капиллярных сил на границе фронта впитывания (границе между областью пористой среды, заполненной жидкостью, и областью, свободной от жидкости) характеризуется скачком давления, который определяется по формуле Лапласа [11]

$$p_p = -4\sigma \cos \theta / d \quad (5)$$

(θ — контактный угол смачивания).

1.3. *Начальные условия.* Начальная форма капли (сферический сегмент) характеризовалась высотой и диаметром основания, что позволяло определить угол смачивания материала поверхности [12]. Начальная геометрия области пористой среды под каплей, заполненной просочившейся жидкостью, задавалась в форме тонкого диска, диаметр которого равен диаметру основания капли, а толщина равна размеру пор среды. Начальные значения компонент скорости движения жидкости в капле и пористой среде принимались равными нулю. Начальное давление в капле определялось в соответствии с уравнением (4), а начальное давление в области пористой среды под каплей, заполненной просочившейся жидкостью, задавалось равным p_p в соответствии с уравнением (5).

1.4. *Численные методы и процедуры.* Численное решение задачи основано на применении известного метода подвижных сеток [13]. Интегрирование системы уравнений (1) и (3) осуществлялось по явной консервативной схеме, имеющей первый порядок точности $O(\tau + h)$. При построении конечно-разностной аппроксимации уравнения (1) и (3) преобразовывались применительно к методу подвижных сеток по методике, предложенной и апробированной в работе [14]. Последовательность вычислений на каждом временном шаге включала нахождение новых значений параметров u , v , p . На первом шаге расчет проводился по заданным начальным и граничным условиям для капли и жидкости, заключенной внутри пористой среды, на последующих — с использованием текущих значений указанных параметров. По найденным значениям скоростей находилось новое положение границ, определяющих форму капли на поверхности среды и продвижение фронта впитывания. При достижении жидкостью внутри пористой среды свободной поверхности граничное условие, определяемое уравнением (5), заменялось условием непротекания. В случае двухслойной среды при достижении жидкостью межслойной границы изменялась величина скачка давления на границе фронта впитывания (см. уравнение (5)) и вводилось соответствующее параметрам слоя значение коэффициента проницаемости (см. уравнение (2)). В результате численного решения определялись изменение формы капель в процессе впитывания, распределение жидкости в пористой среде, поля скоростей и давлений.

2. Эксперимент. Верификация численных расчетов проводилась путем сопоставления с данными экспериментов по впитыванию капель, осаждаемых на одно- и двухслойные пористые среды. В экспериментах использовалась методика стробоскопической визуализации стадий быстропротекающих процессов с последующей их реконструкцией [15]. Для визуализации использовались цифровая видеокамера с микроскопной насадкой и стробоскопическая система с длительностью светового импульса, равной 1,5 мкс.

Осаждение капель размером порядка 1 мм осуществлялось путем выдавливания жидкости через капилляр с внутренним диаметром, равным 0,2 мм. Для осаждения капель малого размера (50 ÷ 60 мкм) использовался картридж струйного принтера. Вариация промежутка времени между моментом выброса капель и вспышкой стробоскопа позволяла выделить различные стадии процесса. Минимальный такой промежуток времени составлял 10 мкс. По результатам измерений геометрических размеров капель рассчитывались зависимости объема капли от времени в процессе впитывания. Погрешность измерения диаметра основания и высоты капель составляла 2 мкм для капель малого размера и 20 мкм для капель размером порядка 1 мм.

В качестве тестовой жидкости использовалась вода. Для визуализации области впитывания вода была подкрашена чернилами. Изменение свойств воды (вязкости, плотности,

поверхностного натяжения) при добавлении чернил (объемная доля 0,1 %) не превышало 1 %.

Капли размером порядка 1 мм осаждались на стандартные стеклянные фильтры (номенклатурный класс пористости F, размер пор $4,0 \div 5,5$ мкм). Пористость фильтра $\varepsilon \approx 0,4$ оценивалась по увеличению массы фильтра после его погружения в воду. Капли размером $50 \div 60$ мкм осаждались на двухслойную бумагу. В результате измерений на оптическом микроскопе установлено, что верхний слой бумаги толщиной $h_1 \approx 25$ мкм представлял собой пористую среду, состоящую из гранул размером $5 \div 10$ мкм. Второй слой толщиной $h_2 \approx 80$ мкм имел волокнистую структуру с размером пустот $10 \div 20$ мкм. При осаждении капель малого объема $V_0 < 10^{-12}$ м³ в пределах разрешения микроскопа 2 мкм заметного впитывания жидкости вторым слоем бумаги не наблюдалось. Жидкость была распределена по объему первого слоя бумаги, что учитывалось при оценке его пористости. По результатам измерений объема капли перед впитыванием, размера пятна, формирующегося на поверхности бумаги в результате впитывания, и толщины первого слоя бумаги, оцениваемая пористость составляла $\varepsilon_1 \approx 0,2$.

Эксперименты показали, что с момента соударения капли с поверхностью до момента времени, когда капля принимала форму сферического сегмента, заметного изменения объема (в пределах погрешности измерения размеров капель) не происходило. Вклад испарения жидкости в процесс дальнейшего уменьшения объема капель не превышал 10 %.

Сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными по впитыванию капель проводилось следующим образом. Начальными данными расчета являлись форма впитываемой капли, задаваемая диаметром ее основания и высотой, толщина и структурные параметры пористой среды, а также свойства жидкости. В качестве приближения угол смачивания в порах θ принимался равным “установившемуся” контактному углу капли на поверхности среды, который, в свою очередь, определялся по значениям высоты и диаметра основания капли. Варьируемым параметром был размер пор. Время впитывания и размер пятна впитавшейся жидкости на поверхности пористой среды, полученные в результате численного моделирования, сравнивались с экспериментальными данными. Различие экспериментальных и расчетных данных в пределах 10 % считалось удовлетворительным.

На рис. 1 представлены экспериментальные и расчетные данные по впитыванию капли стеклянным фильтром: изменение формы капли в процессе впитывания, распространение фронта впитывания, а также изменение объема капли $V(t)/V_0$. Эксперимент включал 10 серий измерений, в которых капли контролируемого объема осаждались на различные участки поверхности фильтра. В качестве примера на рис. 1, б приведены данные для трех серий измерений, характеризующие максимальный разброс экспериментальных значений объема капель в заданные моменты времени, которые сопоставляются с результатами расчетов, выполненных для трех значений размера пор (кривые 1–3). Видно, что результаты расчетов (кривая 2) согласуются с экспериментальными данными, а полученный размер пор $d = 4,5$ мкм находится в интервале значений ($4,0 \div 5,5$ мкм), характеризующих используемый фильтр.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные и результаты расчета по впитыванию капли воды объемом $V_0 = 0,9 \cdot 10^{-13}$ м³ двухслойной бумагой. Приведенные на рис. 2, б данные по изменению объема капли в процессе впитывания, полученные в независимых экспериментах по осаждению капель на различные участки тестируемой бумаги, показывают, какое влияние оказывает неоднородность в структуре пористой среды на впитывание капель. Из представленных на рис. 2 данных следует, что результаты расчетов изменения формы капли, размера формирующегося пятна (рис. 2, а) и зависимость объема капли от времени в процессе впитывания (рис. 2, б) соответствуют экспериментальным

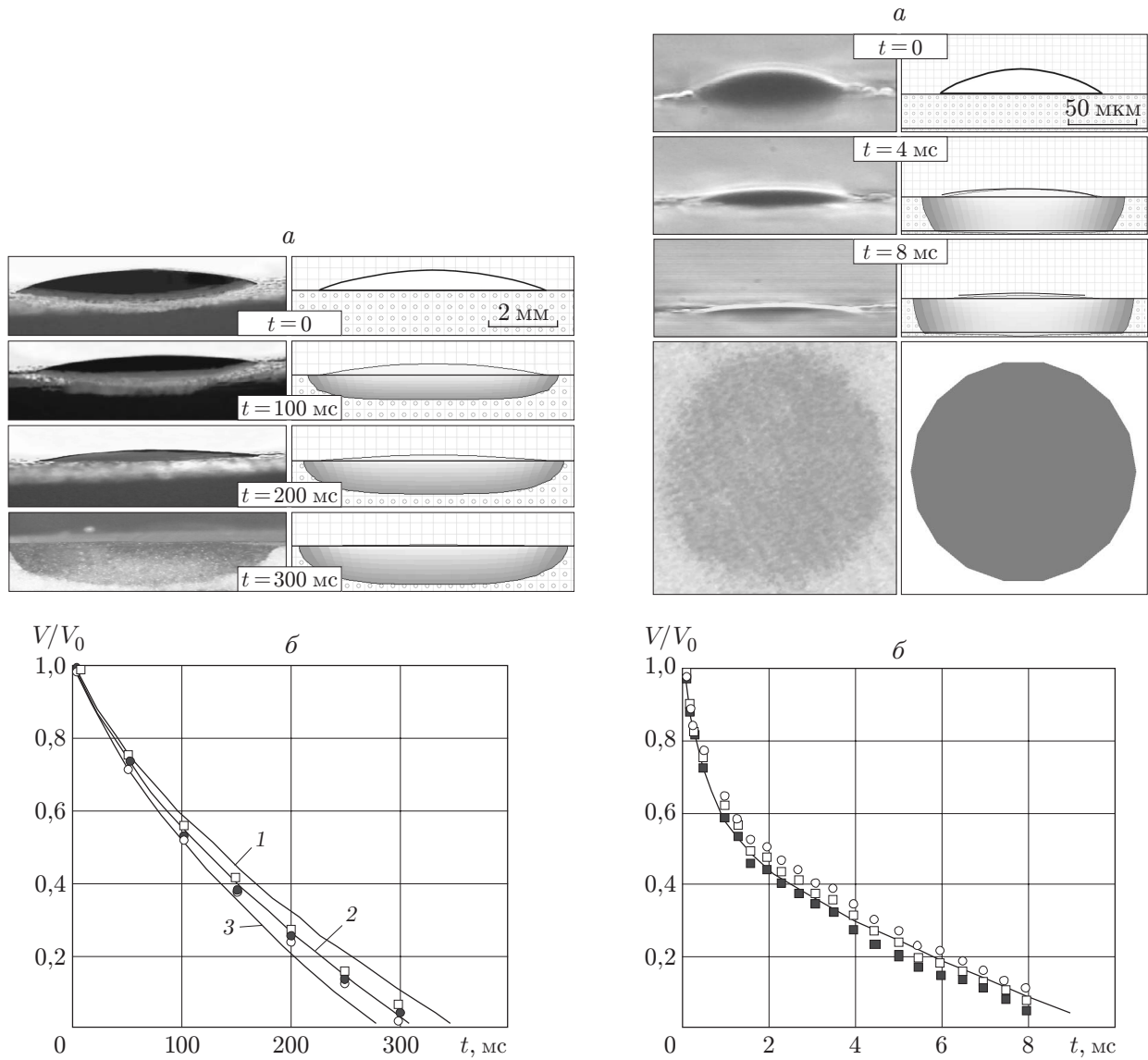


Рис. 1

Рис. 2

Рис. 1. Впитывание капли воды объемом $V_0 = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$ стеклянным фильтром ($\varepsilon = 0,4$):
a — изменение формы капли в процессе впитывания и области пористой среды, заполняемой жидкостью: *слева* — экспериментальные данные, *справа* — результаты расчета ($d = 4,5 \text{ мкм}$); *б* — изменение объема капли $V(t)$ в процессе впитывания: точки — экспериментальные данные для трех серий измерений, линии — результаты расчета (1 — $d = 4 \text{ мкм}$, 2 — $d = 4,5 \text{ мкм}$, 3 — $d = 5 \text{ мкм}$)

Рис. 2. Впитывание капли воды объемом $V_0 = 0,9 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3$ двухслойной бумагой ($\varepsilon_1 = 0,2$, $d_1 = 3,5 \text{ мкм}$):

a — изменение формы капли в процессе впитывания и пятно, формирующееся на поверхности бумаги в результате впитывания: *слева* — экспериментальные данные, *справа* — результаты расчета; *б* — изменение объема капли $V(t)$ в процессе впитывания: точки — экспериментальные данные для трех серий измерений, линия — результаты расчета

данным. Необходимо отметить, что используемое в расчете значение размера пор в верхнем слое бумаги $d_1 = 3,5$ мкм не противоречит результатам оценочных измерений размера пустот между гранулами ($2 \div 6$ мкм), выполненных на оптическом микроскопе. Результаты расчетов показывают, что при размере пор во втором слое $d_2 > 10$ мкм жидкость в этот слой не проникает, что подтверждается в эксперименте.

3. Результаты численного эксперимента. Выполнены численные эксперименты по исследованию влияния структуры двухслойной пористой среды на впитывание капель малого объема. Объем тестовой капли составлял $V_0 = 10^{-13}$ м³. Краевой угол смачивания для материалов первого и второго слоев принимался равным 30° . Варьировались размер пор в слоях, пористость, а также толщина первого слоя пористой среды. В качестве параметров, характеризующих впитывание капель и распределение жидкости в пористой среде, использовались время впитывания 90 % объема капли t_a и площадь S пятна на поверхности пористой среды, формирующегося в результате впитывания.

На рис. 3 приведены зависимости времени впитывания тестовой капли t_a (кривые 1 и 2) и площади формирующегося пятна S (кривые 1' и 2') от соотношения размера пор в первом и втором слоях пористой среды d_1/d_2 . Результаты представлены в относительных координатах t_a/t_{a1} , S/S_1 и d_1/d_2 (t_{a1} , S_1 — время впитывания капли и площадь формирующегося пятна при впитывании только первым слоем пористой среды толщиной h_1).

На рис. 3 видно, что с уменьшением размера пор во втором слое d_2 время впитывания (кривые 1 и 2) и размер пятна (кривые 1' и 2'), формирующегося на поверхности пористой

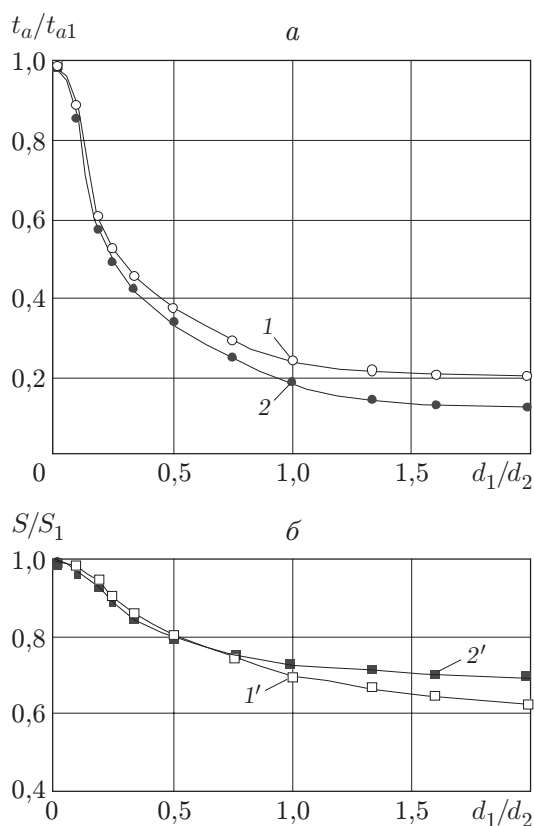


Рис. 3. Зависимости времени впитывания тестовой капли (а) и площади формирующегося пятна (б) от соотношения размера пор d_1/d_2 в первом и втором слоях пористой среды ($V_0 = 10^{-13}$ м³, $h_1 = 20$ мкм, $d_1 = 2$ мкм, $\varepsilon_1 = 0,2$):

1, 1' — $\varepsilon_2 = 0,2$; 2, 2' — $\varepsilon_2 = 0,4$

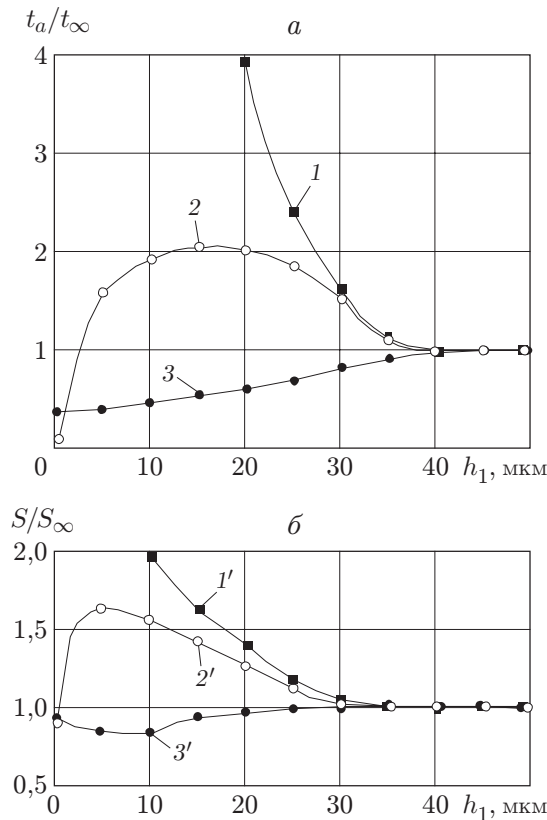


Рис. 4. Зависимости времени впитывания тестовой капли (а) и площади формирующегося пятна (б) от толщины первого слоя двухслойной пористой среды ($\varepsilon_1 = 0,2$, $d_1 = 2$ мкм, $\varepsilon_2 = 0,3$):
 1, 1' — $d_2 = 30$ мкм; 2, 2' — $d_2 = 8$ мкм; 3, 3' — $d_2 = 1$ мкм

среды, уменьшаются. Увеличение пористости второго слоя также приводит к уменьшению времени впитывания (кривые 1 и 2).

Влияние толщины первого слоя пористой среды на время впитывания капли и распределение жидкости в пористой среде показано на рис. 4. Результаты расчетов представлены в относительных координатах t_a/t_∞ и S/S_∞ (t_∞ , S_∞ — время впитывания капли и площадь формирующегося пятна при впитывании первым слоем пористой среды, когда его толщина больше области впитывания). При этих условиях фронт впитывания не достигает межслойной границы и второй слой не оказывает влияния на процесс впитывания капли. Реализуется предельный случай впитывания капли в полуограниченную среду с параметрами, соответствующими первому слою. При нулевой толщине первого слоя имеет место второй предельный случай — впитывание капли полуограниченной средой с параметрами, соответствующими второму слою пористой среды.

При промежуточных значениях толщины первого слоя пористой среды время впитывания капли и распределение жидкости в среде существенно зависят от соотношения структурных параметров слоев (рис. 4). При больших размерах пор во втором слое ($d_2 \gg d_1$) впитывания во второй слой практически не происходит, о чем свидетельствует большой размер пятна, формирующегося на поверхности пористой среды (кривая 1' на рис. 4). Процесс характеризуется большими временами впитывания (кривая 1 на рис. 4). По мере увеличения толщины слоя время впитывания капли и площадь формирующегося пятна уменьшаются (кривые 1 и 1' на рис. 4), приближаясь к значениям, соответствующим случаю впитывания в полуограниченную среду ($t_a/t_\infty \rightarrow 1$, $S/S_\infty \rightarrow 1$).

При уменьшении размера пор второго слоя ($d_2 > d_1$, $d_2 \approx d_1$) возникает поток жидкости во второй слой среды, ускоряющий впитывание капли (кривая 2 на рис. 4). По мере увеличения толщины первого слоя доля жидкости, впитываемой вторым слоем, уменьшается. На зависимостях времени впитывания капли и размера формирующегося пятна от толщины первого слоя наблюдаются характерные максимумы. При дальнейшем увеличении толщины первого слоя время впитывания капли и площадь формирующегося пятна уменьшаются (кривые 2 и 2' на рис. 4), приближаясь к значениям, соответствующим случаю впитывания в полуограниченную среду ($t_a/t_\infty \rightarrow 1$, $S/S_\infty \rightarrow 1$).

Наличие второго слоя с размером пор $d_2 < d_1$ ускоряет впитывание капли (кривые 3 и 3' на рис. 4). При малой толщине первого слоя время впитывания капли меньше, чем в случае впитывания в полуограниченную среду с параметрами, соответствующими первому слою пористой среды ($t_a/t_\infty < 1$). Значительная часть жидкости впитывается вторым слоем, при этом размер пятна $S/S_\infty < 1$. По мере увеличения толщины первого слоя влияние второго слоя ослабевает. Время впитывания и площадь пятна увеличиваются.

4. Обсуждение результатов численного эксперимента. В процессе впитывания капли двухслойной пористой средой можно выделить две стадии: стадию впитывания жидкости первым слоем среды до момента достижения фронтом впитывания границы раздела слоев и стадию, когда жидкость распространяется как в первом, так и во втором слоях. Как показали результаты численного эксперимента (см. рис. 3, 4), процессы на второй стадии существенно зависят от соотношения структурных параметров слоев.

В случае, когда размер пор во втором слое много больше размера пор в первом слое ($d_2 \gg d_1$), впитывания жидкости вторым слоем практически не происходит. Жидкость, достигнув границы раздела слоев, далее движется в основном в радиальном направлении, заполняя пространство первого слоя. Этому случаю соответствуют наибольшие значения длительности впитывания капли и размера пятна, формирующегося на поверхности пористой среды (см. рис. 3), которые существенно превышают значения, соответствующие случаю впитывания в полуограниченную среду с параметрами, соответствующими первому слою (кривые 1 и 1' на рис. 4).

С уменьшением размера пор во втором слое становится существенным поток жидкости, впитываемый вторым слоем. Время впитывания и размер пятна, формирующегося на поверхности пористой среды, уменьшаются (см. рис. 3). В соответствии с моделью (см. уравнения (2), (4), (5)) влияние второго слоя на движение жидкости зависит от коэффициента проницаемости пористой среды и поля давления, которое, в свою очередь, зависит от сил поверхностного натяжения капли и скачка давления на фронте впитывания. При уменьшении размера пор во втором слое коэффициент проницаемости (см. уравнение (2)) уменьшается, что должно приводить к замедлению впитывания жидкости. Так как в численном эксперименте имеет место обратный эффект (см. рис. 3), можно сделать вывод, что основным фактором, определяющим уменьшение времени впитывания при уменьшении размера пор во втором слое, является увеличение скачка давления на фронте впитывания.

Влияние коэффициента проницаемости второго слоя пористой среды на впитывание капли может быть оценено при сопоставлении результатов расчетов, выполненных при различных значениях пористости второго слоя (кривые 1 и 2 на рис. 3). Например, при размере пор во втором слое $d_2 = 4$ мкм увеличение пористости слоя в два раза (с $\varepsilon_2 = 0,2$ до $\varepsilon_2 = 0,4$) приводит к возрастанию коэффициента проницаемости более чем на порядок (см. уравнение (2)). При этом время впитывания капли (кривые 1 и 2 на рис. 3) уменьшается незначительно (приблизительно на 10 %). Эти данные также свидетельствуют о том, что влияние второго слоя на скорость впитывания капли в основном определяется величиной скачка давления, возникающего на фронте впитывания при достижении им границы раздела слоев.

В случае если размер пор во втором слое $d_2 \gg d_1$ и впитывания вторым слоем не происходит, по мере увеличения толщины первого слоя, с одной стороны, возрастает доля жидкости капли, впитываемой до момента достижения фронтом впитывания границы раздела слоев, с другой — увеличивается площадь сечения первого слоя, через которое распространяется жидкость в радиальном направлении. Эти факторы приводят к уменьшению времени впитывания капли и площади формирующегося пятна (кривые 1 и 1' на рис. 4).

При уменьшении размера пор во втором слое ($d_2 > d_1$, $d_2 \approx d_1$) возникает поток жидкости во второй слой среды, что ускоряет впитывание капли (кривая 2 на рис. 4). При увеличении толщины первого слоя влияние второго слоя уменьшается. Однако увеличивается доля жидкости капли, впитываемой первым слоем до момента достижения фронтом впитывания границы раздела слоев, что приводит к уменьшению общего времени впитывания. Увеличивается также площадь сечения первого слоя, через которое распространяется жидкость в радиальном направлении, что также ускоряет впитывание капли. В результате на зависимостях времени впитывания капли и размера формирующегося пятна от толщины первого слоя наблюдаются максимумы (кривые 2 и 2' на рис. 4).

В случае если размер пор во втором слое меньше размера пор в первом слое ($d_2 < d_1$), скачок давления, возникающий при достижении жидкостью второго слоя, превышает скачок давления на фронте распространения жидкости в первом слое. В результате жидкость, достигнув границы раздела слоев, в основном впитывается вторым слоем. При этом время впитывания капли и размер формирующегося пятна (кривые 3 и 3' на рис. 4) меньше, чем в случае впитывания в полуограниченную среду с параметрами, соответствующими первому слою пористой среды ($t_a/t_\infty < 1$, $S/S_\infty < 1$). Так как при увеличении толщины первого слоя влияние второго слоя уменьшается, время впитывания и площадь формирующегося пятна увеличиваются, приближаясь к значениям, соответствующим случаю впитывания в полуограниченную среду ($t_a/t_\infty \rightarrow 1$, $S/S_\infty \rightarrow 1$).

Заключение. В работе представлена двумерная модель впитывания капель одно- и двухслойными пористыми средами, в которой пористая среда характеризовалась эффективным коэффициентом проницаемости, зависящим от пористости и размера пор. Результаты сопоставления численных расчетов с экспериментальными данными свидетельствуют о том, что предложенная модель адекватно описывает процесс впитывания капель пористыми средами.

Численные эксперименты показали, что наличие второго слоя может привести к существенному изменению характера распределения жидкости в среде. Основным параметром, определяющим влияние второго слоя, является размер пор, от которого зависят капиллярные силы на фронте впитывания и поле давления в жидкости.

Для сред с размером пор во втором слое, много большим размера пор в первом слое, впитывания вторым слоем не происходит, и жидкость заполняет пространство первого слоя. Такие среды характеризуются наибольшими длительностью впитывания капель и размером пятен, формирующихся на их поверхности. Наименьшими длительностью впитывания капель и размером пятен характеризуются среды, в которых размер пор во втором слое меньше размера пор в первом слое. В этих средах жидкость, достигнув границы раздела слоев, далее впитывается в основном вторым слоем. Если для указанных соотношений размеров пор увеличение толщины первого слоя приводит к уменьшению влияния второго слоя, то для сред с размером пор во втором слое, бóльшим, но сопоставимым с размером пор в первом слое, на зависимостях времени впитывания капли и размера формирующегося пятна от толщины первого слоя имеют место характерные максимумы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шейдеггер А. Е.** Физика течения жидкостей через пористые среды. М.: Гостехтеоретиздат, 1960.
2. **Баренблатт Г. И.** Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа / Г. И. Баренблатт, В. М. Энтов, В. М. Ригик. М.: Недра, 1972.
3. **Bear J.** Dynamics of fluids in porous media. N. Y.: Dover Publ. Inc., 1972.
4. **Clarke A., Blake T. D., Carruthers K., Woodward A.** Spreading and imbibition of liquid droplets on porous surfaces // *Langmuir*. 2002. N 18. P. 2980–2984.
5. **Davis S. H., Hocking L. M.** Spreading and imbibition of viscous liquid on a porous base II // *Phys. Fluids*. 2000. V. 12, N 7. P. 1646–1655.
6. **Schwartz L. W.** Theoretical and numerical modeling of coating flow on simple and complex substrates including theology, drying and Marangoni effects // *Advances in coating and drying of thin films*. Aachen: Shaker-Verlag, 1999. P. 105–128.
7. **Starov V. M., Kostvintsev S. R., Sobolev V. D., et al.** Spreading of liquid drops over dry porous layers: complete wetting case // *J. Colloid Interface Sci.* 2002. N 252. P. 397–408.
8. **Alleborn N., Raszillier H.** Spreading and sorption of droplets on layered porous substrates // *J. Colloid Interface Sci.* 2004. N 280. P. 449–464.
9. **Rein V.** Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces // *Fluid Dynamics Res.* 1993. N 12. P. 61–93.
10. **Кочин Н. Е.** Теоретическая гидромеханика / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. М.: Физматгиз, 1963. Ч. 1.
11. **Роулинсон Дж.** Молекулярная теория капиллярности / Дж. Роулинсон, Б. Уидом. М.: Мир, 1986.
12. **Gennes de P.** Wetting: statics and dynamics // *Rev. Modern Phys.* 1985. V. 57. P. 827–863.
13. **Численное решение многомерных задач газовой динамики** / Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976.
14. **Мещеряков Ю. П., Шапеев В. П., Яненко Н. Н.** Решение модельной задачи кумуляции в подвижных сетках // Тр. VII Всесоюз. конф. “Численные методы решения задач упругости и пластичности”, Миасс, 1–3 июля 1981 г. Новосибирск: Ин-т теорет. и прикл. механики СО АН СССР, 1982. С. 193–198.
15. **Предтеченский М. Р., Черепанов А. Н., Попов В. Н., Варламов Ю. Д.** Исследование динамики соударения и кристаллизации жидкометаллической капли с многослойной подложкой // *ПМТФ*. 2002. Т. 43, № 1. С. 112–123.

*Поступила в редакцию 29/XII 2005 г.,
в окончательном варианте — 5/IV 2006 г.*
