

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 539.379

doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-64-74

Моделирование динамики смачивания абсолютно жесткого бака методом частиц

С.В. Аринчев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Modelling the Dynamics of Wetting of an Absolutely Rigid Tank Using the Particles Method

S.V. Arinchev

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрена модель, включающая в себя две системы частиц — жидкости и стенки бака. Бак не деформируется, его частицы неподвижны. Частицы жидкости движутся в плоскости под действием сил. Каждая частица жидкости взаимодействует с каждой частицей стенки бака. Система частиц жидкости «смачивает» поверхность бака, если она находится достаточно близко (в некотором смысле) к системе частиц стенки бака. Норму близости двух систем частиц называют степенью смачивания. Исследован динамический процесс перехода частиц жидкости из начального состояния в конечное. В начальном состоянии система частиц жидкости расположена некоторым произвольным образом относительно системы частиц стенки бака. В конечном состоянии частицы жидкости переходят в ближайшую окрестность системы частиц стенки бака и «смачивают» ее. Задача рассмотрена в двумерной постановке. Предлагаемая модель является макроскопической. Частица — материальная точка с заданной силовой характеристикой. Частица жидкости ассоциирована с каплей. Рассматриваемая задача анализа переходного процесса — задача капельной динамики. Уравнения динамики частиц жидкости интегрированы методом Рунге — Кутты. Решение сходится по числу частиц достаточно быстро.

Ключевые слова: метод частиц, капельная динамика, степень смачивания, переходный процесс

This work examines a model consisting of two systems of particles, those of liquid and of a tank wall. The tank is not deformed, and its particles are stationary. The liquid particles move in a plane under the action of forces. Each liquid particle interacts with each tank wall particle. The system of liquid particles “wets” the surface of the tank if it is close enough to the system of tank wall particles. The norm of proximity of the two systems is called the degree of wetting. A dynamic process of the liquid particle transfer from the initial to the final state is studied in this work. In the initial state, the system of liquid particles is arbitrarily positioned relative to the particles of the tank wall. In the final state, liquid particles transfer to the nearest neighbourhood of the tank wall particle system and “wet” it. The problem is considered in a two-dimensional formulation. The particle is a material point with a set power characteristic, and a liquid particle is associated with a drop. The analysis of the

transfer process is a droplet dynamics problem. The equations of dynamics of the liquid particles are integrated using Runge-Kutta method. The solution converges quickly with regard to particle numbers.

Keywords: particle method, droplet dynamics, degree of wetting

Пропитывание ячеек матрицы композиционного материала вязким связующим (с последующим отверждением) — важнейший этап изготовления композитов [1]. Пропитывание включает в себя подачу жидкости в заданный объем ячейки матрицы, ограниченной армирующими элементами, и смачивание его стенок. Процесс смачивания поверхностей ячейки композиционного материала связующим (окувание, нанесение кистью, напыление и т. п.) имеет динамический характер, который изучен недостаточно. При смачивании частицы связующего взаимодействуют между собой, сцепляются с поверхностью армирующих элементов и растекаются по ней.

В большинстве работ по смачиванию использован микроскопический подход. Как правило, объект исследования — физико-химические особенности контакта отдельной капли жидкости с твердой поверхностью. Традиционно для анализа смачивания используют такие понятия, как свободная поверхностная энергия, коэффициент поверхностного натяжения жидкости, работа разделения жидкости и твердого тела по межфазной границе и т. п. [2].

Так, в работе [3] предложено фундаментальное адсорбционное уравнение, рассчитаны адсорбционные константы твердых тел с малой удельной поверхностью. В статье [4] изучены краевые углы и гистерезис смачивания гидрофобизированной хлопчатобумажной ткани. В публикации [5] рассмотрены особенности формирования тонких (порядка 30 мкм) дискретных зон растворителя избирательным смачиванием.

В работе [6] получены температурные и временные зависимости краевого угла смачивания и диаметра пятна поверхности, смоченной расплавом Sn-Cu. В статье [7] выведено новое уравнение работы адгезии при смачивании твердой поверхности жидкой фазой. В публикации [8] предложена методика расчета краевого угла и линейного натяжения поверхности наноклапты при смачивании поверхности подложки.

В работе [9] показано, что при обработке полимерных композиционных пленок коронным

разрядом поверхностное натяжение увеличивается. В статье [10] установлено, что силы смачивания стали алюминием резко возрастают после активации стальной поверхности специальными флюсами. В публикации [11] разработана компьютерная программа (на основе алгоритма скоростей Верле метода молекулярной динамики) анализа процесса растекания лэннард-джонсовских капель, содержащих до 32000 атомов.

В работе [12] приведены результаты экспериментального исследования повторного смачивания (стекающей пленкой азота) поверхности вертикального медного нагревателя. В статье [13] изучено влияние сил Ван-дер-Ваальса на изменение краевого угла, растекание капли и динамику мениска. В публикации [14] предложено решение задачи о собственных колебаниях цилиндрической капли с учетом динамики контактной линии. В работе [15] приведены результаты компьютерного эксперимента по формированию капли ртути на поверхности графена.

Труды [16] посвящены моделированию (методом молекулярной динамики) динамической вязкости и самодиффузии воды. Показано, что сопоставление результатов расчета и эксперимента имеет смысл, если число молекул не менее 64000. Особенности широко используемого (с 1957 г.) метода молекулярной динамики (предназначенного для изучения микроскопических эффектов) детально описаны в монографии Д.К. Рапапорта [17].

Рассматриваемые задачи капельной динамики также имеют, как правило, микрокапельный характер. Так, в работе [18] исследована динамика поведения микрокапельной фазы материала катода при функционировании вакуумной дуги. В статье [19] изучена динамика микрокапельной фазы в плазме дугового разряда низкого давления. В диссертации [20] предложена методика анализа динамики капельных микроструктур при акусто-вибрационном воздействии.

При анализе дискретных структур авторам бывает трудно отказаться от привычных непрерывных подходов. Так, в трудах [21, 22] по

смачиванию гранулированных материалов использованы уравнения состояния и теплопроводности в частных производных.

Указанные результаты анализа микроскопических систем трудно перенести непосредственно на решение производственно-технологических задач, имеющих не микроскопический характер, а макроскопический. Поэтому в настоящей статье частица жидкости ассоциирована с каплей размером от нескольких миллиметров и более.

Цель работы — формулирование задачи анализа динамики смачивания твердой поверхности как задачи Коши с начальными условиями и разработка метода ее решения.

Рассмотрено взаимодействие жидкости со стенками абсолютно жесткого бака. Жидкость и стенки бака разбиты на дискретные частицы. Введены две силовые характеристики: жидкость — жидкость и жидкость — стенка. Все частицы — материальные точки. Частицы стенки (ЧС) неподвижны. Частицы жидкости (ЧЖ) движутся к стенке под действием приложенных сил. Эффект смачивания проявляется в том, что активно продвигаясь к стенке, частицы «расталкивают» друг друга.

Уравнения динамики ЧЖ (уравнения капельной динамики) проинтегрированы по времени. Если в результате переходного процесса, имеющего колебательный характер, ЧЖ оказываются достаточно близко к ЧС (в некотором смысле), то происходит смачивание. Задача рассмотрена в двумерной постановке.

На рис. 1 приведена силовая характеристика частицы в общем виде, представляющая собой зависимость силы взаимодействия F между частицами от расстояния d между ними. Кривая имеет пять параметров a_1, \dots, a_5 . Использована

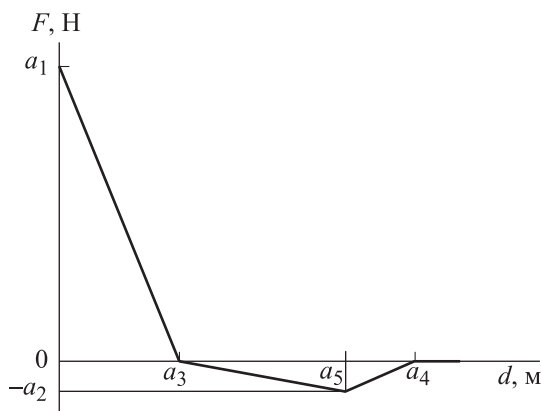


Рис. 1. Силовая характеристика частицы в общем виде

кусочно-линейная аппроксимация. Участок a_1-a_2 — отталкивание, участок a_3-a_4 — притяжение. Частицы перестают взаимодействовать, и сила $F = 0$, если $d > a_4$.

В общем виде силовая характеристика формализована следующим образом:

$$F(d) = F_j(d), \quad j = 1, 2, 3, 4;$$

$$F_j(d) = k_j d + b_j, \quad j = 1, 2, 3,$$

где

$$k_1 = -a_1/3, \quad b_1 = a_1, \quad 0 \leq d \leq a_3;$$

$$k_2 = a_2/(a_3 - a_5), \quad b_2 = -k_2 a_3, \quad a_3 \leq d \leq a_5;$$

$$k_3 = a_2/(a_4 - a_5), \quad b_3 = -k_3 a_4, \quad a_5 \leq d \leq a_4;$$

$$F_4(d) \equiv 0, \quad d \geq a_4.$$

Для обозначения параметров силовых характеристик жидкость — жидкость (liquid — liquid) и жидкость — стена (liquid — wall) использованы индексы «ll» и «lw» соответственно:

$$a_j = a_j^{ll}; \quad j = 1, 2, 3, 4, 5;$$

$$F_{ip}^{ll} = F_j^{ll}(d_{ip}); \quad j = 1, 2, 3, 4; \quad i = 1, \dots, n; \quad p = 1, \dots, n;$$

$$a_j = a_j^{lw}; \quad j = 1, 2, 3, 4, 5;$$

$$F_{iq}^{lw} = F_j^{lw}(d_{iq}); \quad j = 1, 2, 3, 4; \quad i = 1, \dots, n; \quad q = n+1, \dots, s.$$

Каждая частица взаимодействует с каждой другой, сама с собой частица не взаимодействует.

На рис. 2 проиллюстрирована характерная картина динамики смачивания при числе ЧЖ $n = 3$ и общем числе частиц (ЧЖ + ЧС) $s = 7$ и с учетом силы тяжести mg (m — масса ЧЖ). ЧС № 4–7 неподвижны. Двигаясь к стенке, задняя ЧЖ № 1 «протискивается» между соседними ЧЖ № 2 и 3, находящимися ближе к стенке, и «расталкивает» их. В исходном положении ЧЖ № 1–3 обозначены сиреневым цветом и буквой «a», в конечном положении — розовым цветом и буквой «b». Для анализа соответствующего переходного процесса сформулирована задача Коши с начальными условиями.

Уравнения динамики ЧЖ (см. рис. 2) имеют вид

$$\begin{aligned} & -m\ddot{x}_1 - f\dot{x}_1 + (F_{12}^{ll} \cos \varphi_{12} + F_{13}^{ll} \cos \varphi_{13}) + \\ & + (F_{14}^{lw} \cos \varphi_{14} + F_{15}^{lw} \cos \varphi_{15} + F_{16}^{lw} \cos \varphi_{16} + \\ & + F_{17}^{lw} \cos \varphi_{17}) = 0; \end{aligned}$$

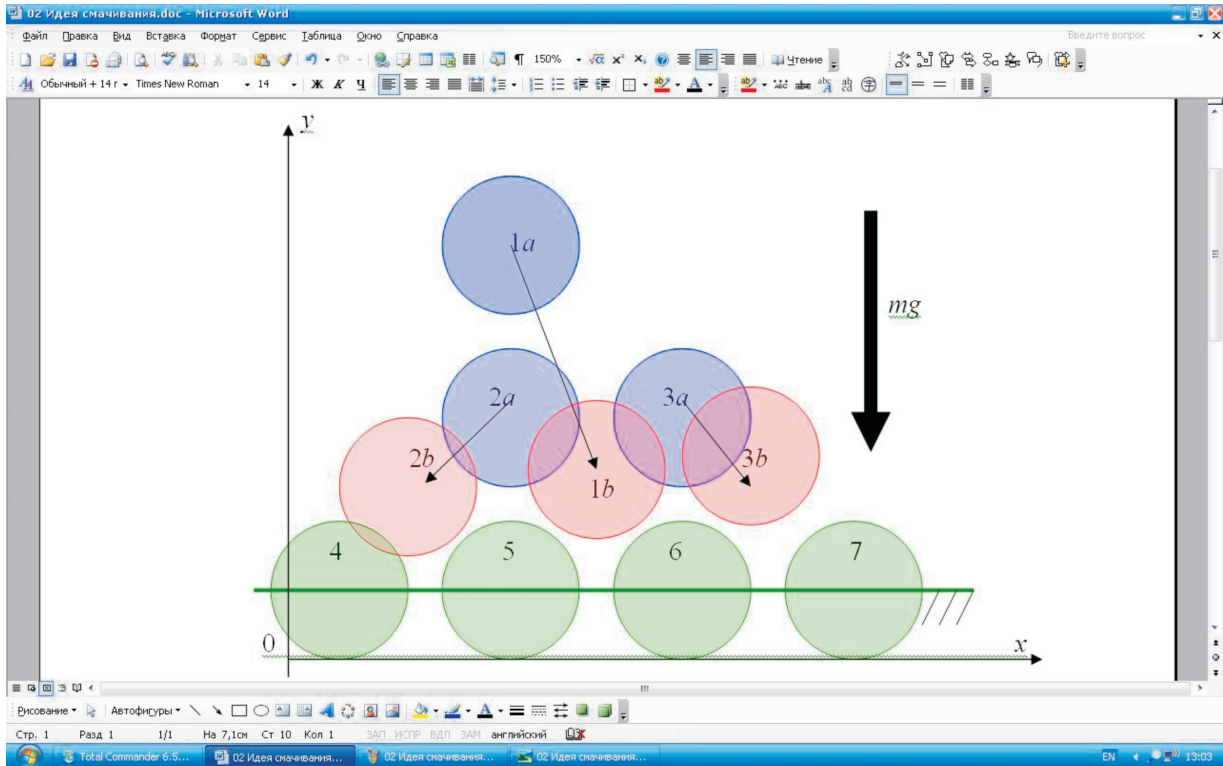


Рис. 2. Характерная картина динамики смачивания при $s = 7$ и $n = 3$

$$\begin{aligned}
 & -m\ddot{x}_2 - f\dot{x}_2 + (F_{21}^{ll} \cos \varphi_{21} + F_{23}^{ll} \cos \varphi_{13}) + \\
 & + (F_{24}^{lw} \cos \varphi_{24} + F_{25}^{lw} \cos \varphi_{25} + F_{26}^{lw} \cos \varphi_{26} + \\
 & + F_{27}^{lw} \cos \varphi_{27}) = 0; \\
 & -m\ddot{x}_3 - f\dot{x}_3 + (F_{31}^{ll} \cos \varphi_{31} + F_{32}^{ll} \cos \varphi_{32}) + \\
 & + (F_{34}^{lw} \cos \varphi_{34} + F_{35}^{lw} \cos \varphi_{35} + F_{36}^{lw} \cos \varphi_{36} + \\
 & + F_{37}^{lw} \cos \varphi_{37}) = 0; \\
 & -m\ddot{y}_1 - f\dot{y}_1 - mg + (F_{12}^{ll} \sin \varphi_{12} + F_{13}^{ll} \sin \varphi_{13}) + \\
 & + (F_{14}^{lw} \sin \varphi_{14} + F_{15}^{lw} \sin \varphi_{15} + F_{16}^{lw} \sin \varphi_{16} + \\
 & + F_{17}^{lw} \sin \varphi_{17}) = 0; \\
 & -m\ddot{y}_2 - f\dot{y}_2 - mg + (F_{21}^{ll} \sin \varphi_{21} + F_{23}^{ll} \sin \varphi_{13}) + \\
 & + (F_{24}^{lw} \sin \varphi_{24} + F_{25}^{lw} \sin \varphi_{25} + F_{26}^{lw} \sin \varphi_{26} + \\
 & + F_{27}^{lw} \sin \varphi_{27}) = 0; \\
 & -m\ddot{y}_3 - f\dot{y}_3 - mg + (F_{31}^{ll} \sin \varphi_{31} + F_{32}^{ll} \sin \varphi_{32}) + \\
 & + (F_{34}^{lw} \sin \varphi_{34} + F_{35}^{lw} \sin \varphi_{35} + F_{36}^{lw} \sin \varphi_{36} + \\
 & + F_{37}^{lw} \sin \varphi_{37}) = 0,
 \end{aligned}$$

где f — вязкость жидкости;

$$d_{ip} = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2}, \quad i = 1, \dots, n, \quad p = 1, \dots, s,$$

$$n = 3; \quad s = 7; \quad \cos \varphi_{ip} = \frac{x_p - x_i}{d_{ip}}; \quad \sin \varphi_{ip} = \frac{y_p - y_i}{d_{ip}}.$$

Начальные условия интегрирования определяются рис. 2.

Рассмотрим общий случай смачивания частицами жидкости частиц стенки абсолютно жесткого бака. ЧЖ ассоциированы с каплями. Уравнения динамики ЧЖ (уравнения капельной динамики) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & -m\ddot{x}_i - f\dot{x}_i + \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq i}}^n F_{ip}^{ll} \cos \varphi_{ip} + \sum_{q=n+1}^s F_{iq}^{lw} \cos \varphi_{iq} = 0; \\
 & -m\ddot{y}_i - f\dot{y}_i - mg + \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq i}}^n F_{ip}^{ll} \sin \varphi_{ip} + \\
 & + \sum_{q=n+1}^s F_{iq}^{lw} \sin \varphi_{iq} = 0, \quad i = 1, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Количественной мерой степени близости двух систем частиц (ЧЖ и ЧС) является степень смачивания *wetting degree*. Эту меру можно представить по-разному. В данной работе принят алгоритм

wetting degree =

$$= \sum_{i=1}^n \min_{q=n+1, \dots, s} [(x_q - x_i)^2 + (y_q - y_i)^2], \quad \text{м}^2,$$

где для каждой ЧЖ предварительно выбирается ближайшая к ней ЧС (по квадрату расстоя-

ния от ЧЖ до ЧС). Степень смачивания — это сумма (по всем частицам жидкости) данных квадратов расстояний от каждой ЧЖ до соответствующей ближайшей ЧС.

Отметим высокую скорость сходимости решения по числу частиц. Критерий сходимости — конечное значение степени смачивания. Далее покажем, что решение приобретает физический смысл, если число частиц составляет несколько десятков.

Проведено моделирование процесса смачивания бака при числе ЧЖ $n = 20$ и общем числе частиц $s = 45$ с учетом силы тяжести. Частицы жидкости ассоциированы с каплями. Рассматриваемые уравнения капельной динамики (1) интегрированы методом Рунге — Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага. Начальные условия интегрирования определяются рис. 3.

На рис. 3 показаны начальные (●) и конечные (○) положения ЧЖ в окрестности стенки бака. ЧС (●) неподвижны. Начальные скорости частиц — нулевые.

Приняты следующие расчетные значения параметров модели: $a_1^{\parallel} = 100,0$ Н; $a_2^{\parallel} = 0,1$ Н; $a_3^{\parallel} = 0,1$ м; $a_4^{\parallel} = 0,3$ м; $a_5^{\parallel} = 0,2$ м; $a_1^{hw} = 5000,0$ Н,

$a_2^{hw} = 5,0$ Н; $a_3^{hw} = 0,1$ м, $a_4^{hw} = 0,5$ м; $a_5^{hw} = 0,3$ м; $f = 200$ кг/с; $m = 10$ кг, верхнее пороговое значение приращения фазовых координат на шаге интегрирования $\Delta = 0,05$ м, м/с.

Если приращение фазовых координат на шаге интегрирования больше порогового значения, то шаг делится пополам. При этом точность интегрирования повышается, время интегрирования возрастает.

Под действием приложенных сил, ЧЖ из начального положения (см. рис. 3, синяя ломаная) переходят в конечное положение (малиновая ломаная) вблизи стенки бака (зеленые линии) и смачивают ее. В конечном положении ЧЖ не попадают на саму стенку. Между ней и ЧЖ имеется отступ, значение которого определяется корнем силовой характеристики $a_3^{hw} = 0,1$ м. Как видно из рис. 3, в процессе смачивания верхние ЧЖ протиснулись между нижними соседями и «растолкали» их.

На рис. 4 показана траектория движения ЧЖ № 1. В процессе смачивания, вышележащая ЧЖ № 2 протискивается между ней и стенкой. Поэтому частица № 1 совершает не только вертикальные, но и боковые колебательные движения.

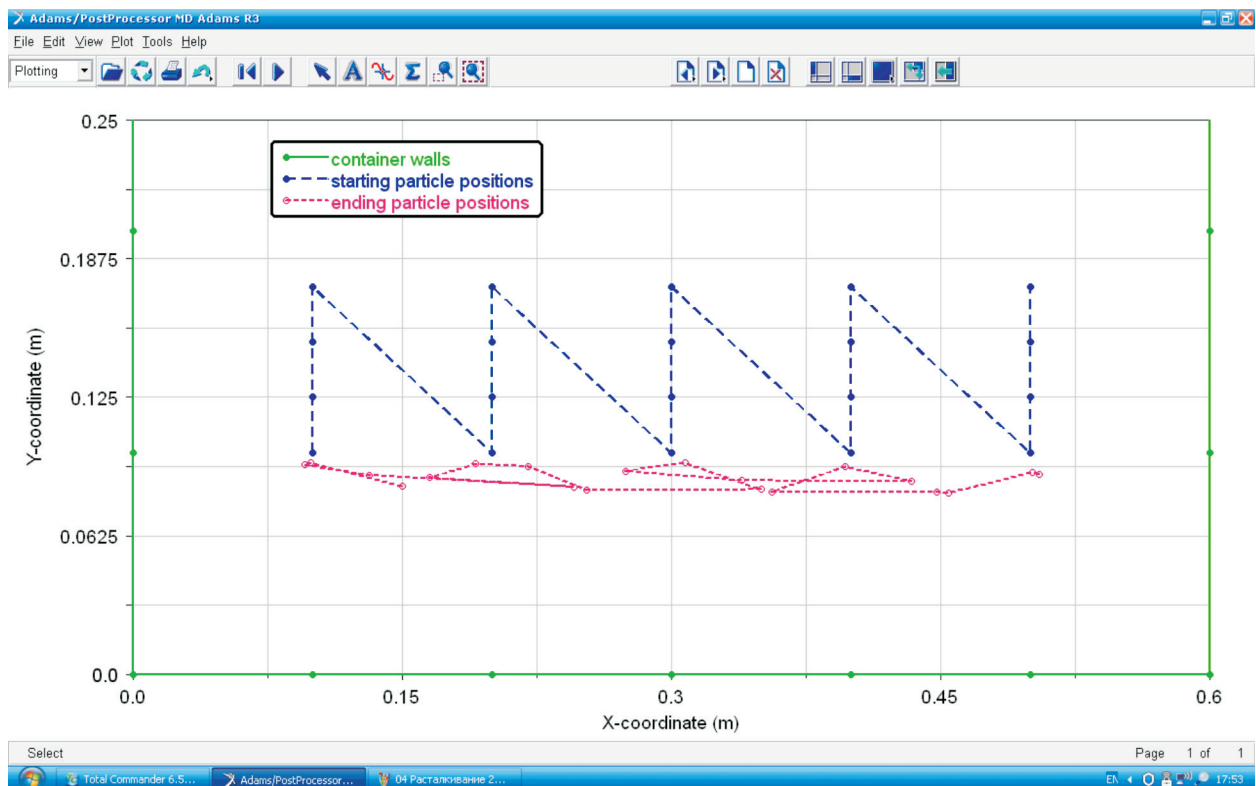


Рис. 3. Начальные (●) и конечные (○) положения ЧЖ в окрестности стенки бака при $n = 20$ и $s = 45$

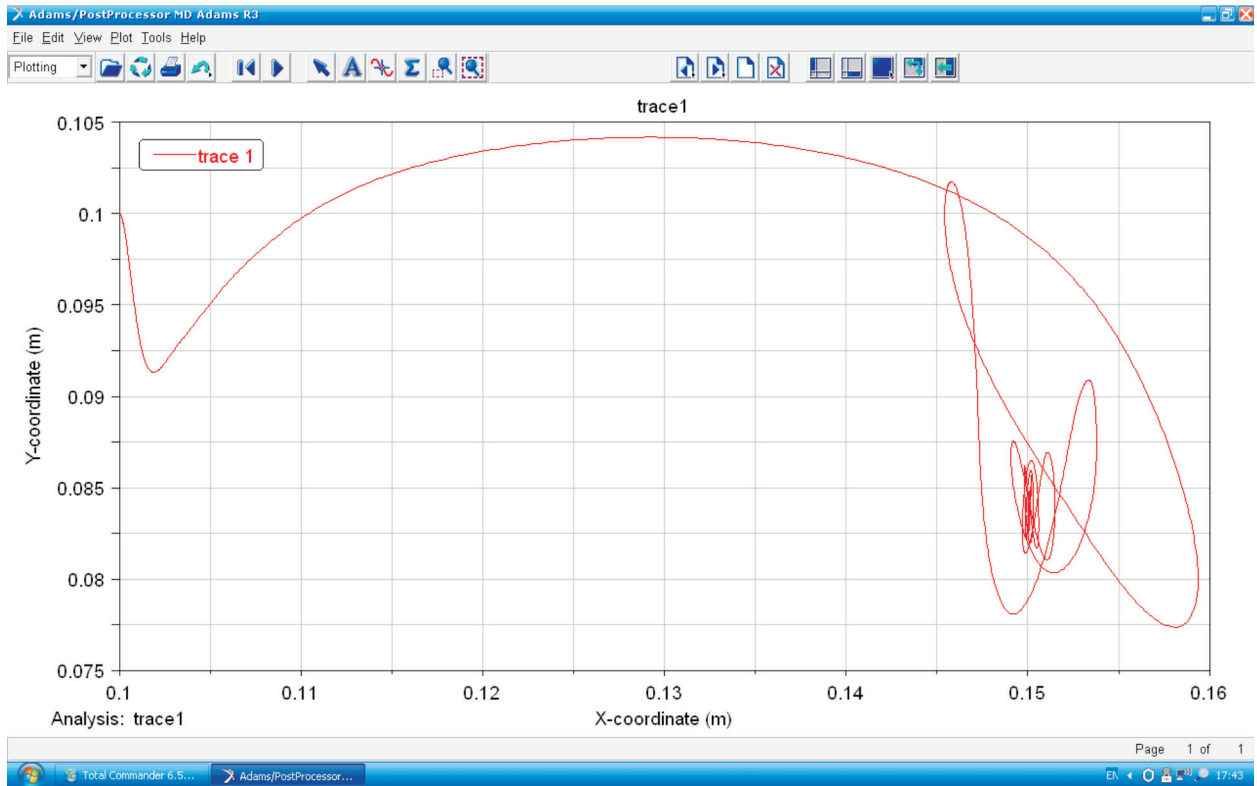


Рис. 4. Вертикальные и боковые колебательные движения ЧЖ № 1 в окрестности дна бака при $n = 20$ и $s = 45$

На рис. 5 показана зависимость степени смачивания стенки бака от времени при разной вязкости жидкости f . Видно, что изменение степени смачивания имеет колебательный характер. Степень смачивания *wetting degree*, установившаяся при большой вязкости $f = 200$ кг/с к моменту времени $t = 1$ с, составила $1,78 \text{ м}^2$.

Для сравнения и оценки скорости сходимости предлагаемой вычислительной процедуры рассмотрен вариант с удвоенным числом частиц ($n = 40, s = 90$). Сила тяжести также учитывалась. Рассматриваемые уравнения капельной динамики (1) аналогично интегрированы методом Рунге — Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага.

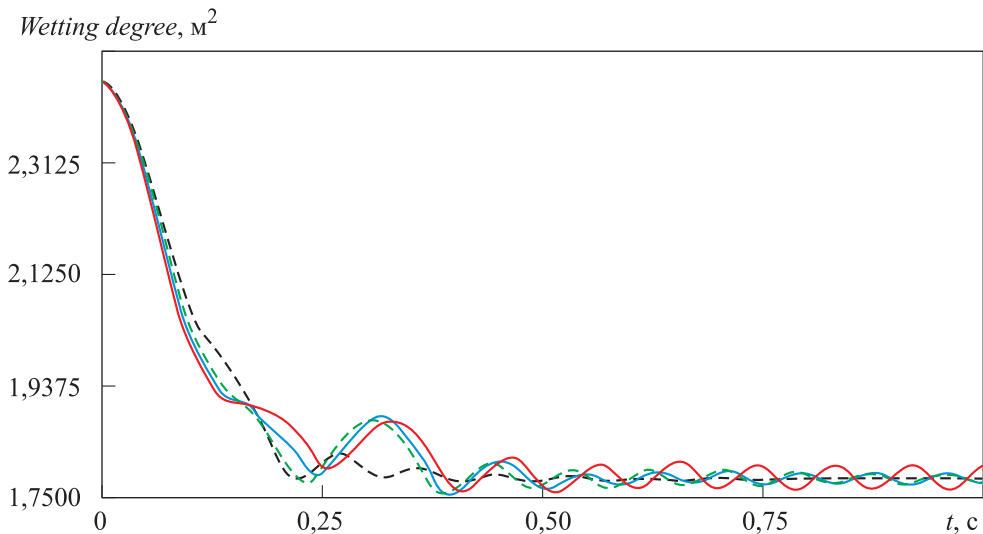


Рис. 5. Зависимость степени смачивания стенки бака от времени при $n = 20, s = 45$ и $f = 115$ (—), 130 (—), 150 (---) и 200 кг/с (---)

На рис. 6 показаны начальные (●) и конечные (○) положения ЧЖ в окрестности стенки бака при $n = 20$ и $s = 45$. ЧС (●) неподвижны. Начальные скорости ЧЖ — нулевые.

Приняты следующие расчетные значения параметров модели: $a_1^H = 100,0$ Н; $a_2^H = 0,1$ Н; $a_3^H = 0,05$ м; $a_4^H = 0,15$ м; $a_5^H = 0,10$ м; $a_1^{Hv} = 1000,0$ Н; $a_2^{Hv} = 0,5$ Н; $a_3^{Hv} = 0,05$ м; $a_4^{Hv} = 0,25$ м; $a_5^{Hv} = 0,15$ м; $f = 200$ кг/с, $m = 5$ кг, $\Delta = 0,05$ м, м/с.

Под действием приложенных сил, ЧЖ из начального положения (см. рис. 6, синяя ломаная) переходят в конечное положение (малиновая ломаная) вблизи стенки бака (зеленые линии) и смачивают ее. В конечном положении ЧЖ не попадают на саму стенку. Между ней и ЧЖ имеется отступ, определяемый корнем силовой характеристики $a_3^{Hv} = 0,05$ м. Как видно из рис. 6, в процессе смачивания верхние ЧЖ протиснулись между нижними соседями и «растолкали» их.

На рис. 7 показаны траектории движения ЧЖ № 1–4. Вышележащие частицы протискиваются к днищу, поэтому все ЧЖ совершают не только вертикальные, но и боковые колебательные движения.

На рис. 8 показана зависимость степени смачивания стенок бака от времени. Процесс изменения степени смачивания имеет колебательный характер. Степень смачивания *wetting degree*, установившаяся при вязкости $f = 200$ кг/с к моменту времени $t = 1$ с, составила $1,42$ м².

Степень смачивания *wetting degree* = $1,42$ м² — это значение критерия сходимости вычислительной процедуры по числу частиц. Из рис. 8 видно, что увеличение числа ЧЖ в 2 раза привело к изменению значения критерия сходимости только на 20,2 %. Таким образом, предлагаемый подход имеет высокую скорость сходимости по числу частиц. Нет необходимости брать число

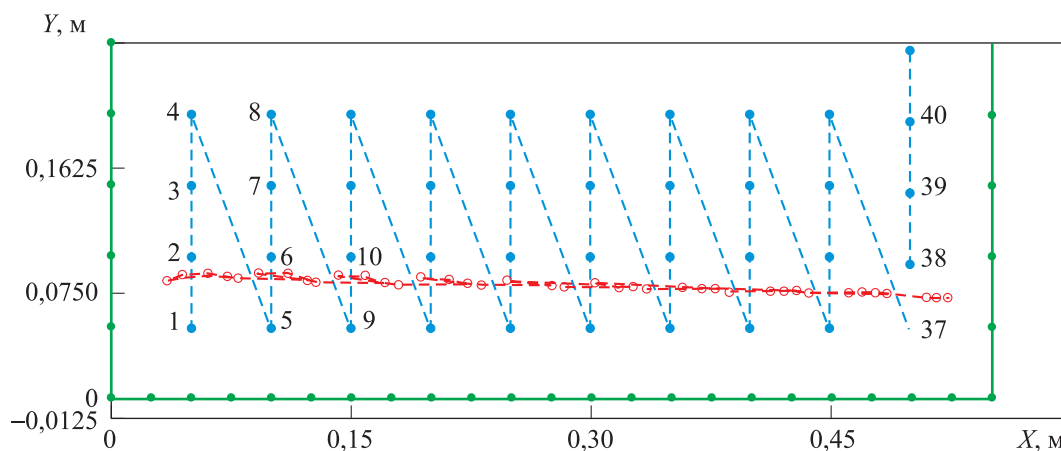


Рис. 6. Начальные (●) и конечные (○) положения ЧЖ в окрестности стенки бака при $n = 40$ и $s = 90$

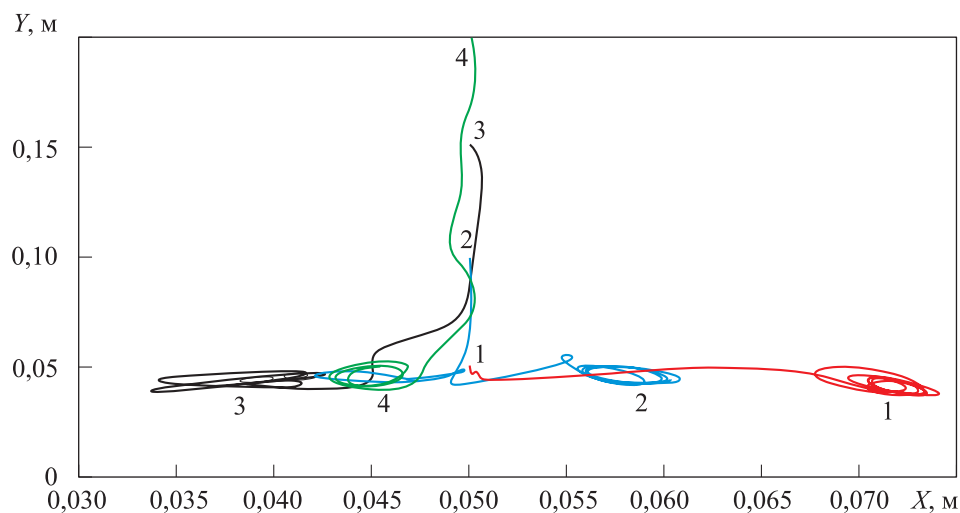


Рис. 7. Вертикальные и боковые движения ЧЖ № 1–4 в окрестности днища бака при $n = 40$ и $s = 90$

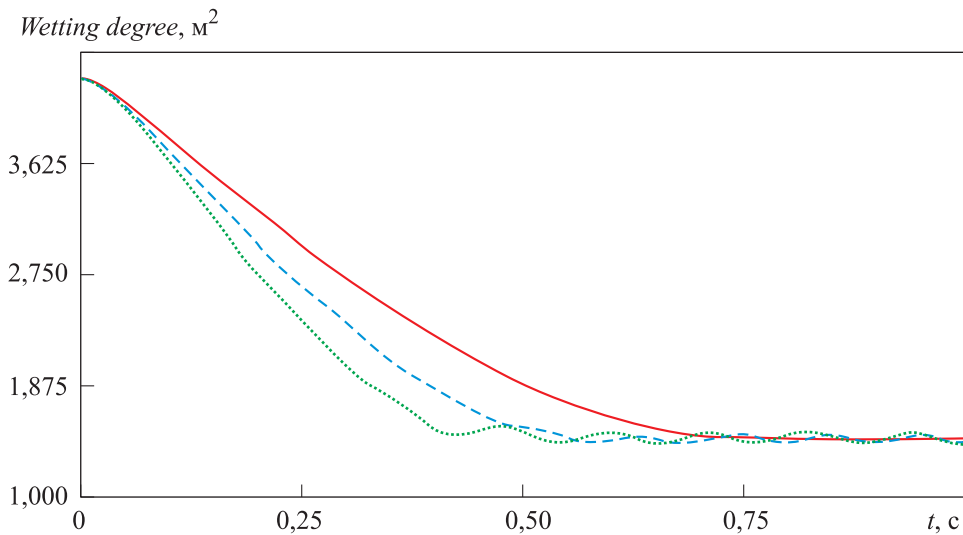


Рис. 8. Зависимость степени смачивания стенки бака от времени при $n = 40$, $s = 90$ и вязкости $f = 200$ (—), 150 (- - -) и 120 кг/с (.....)

частиц, соизмеримое с числом Авогадро, равным $6,02 \cdot 10^{23}$ частиц/моль. Несколько десятков (сотен) частиц достаточно для получения достоверной двумерной оценки.

Выводы

1. Предложена методика компьютерного моделирования динамического процесса смачива-

ния твердой поверхности методом частиц. Полученные результаты могут оказаться полезными при разработке технологии пропитки матрицы композитного материала вязким связующим.

2. Выявлена высокая скорость сходимости предложенной вычислительной процедуры по числу частиц. Несколько десятков (сотен) частиц достаточно для получения достоверной двумерной оценки.

Литература

- [1] Пье Пху Маунг, Малышева Г.В. Моделирование кинетики процесса пропитывания при производстве рефлекторов зеркальных космических антенн из углепластиков. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 5, с. 38–47, doi: 10.18698/0236-3941-2016-5-38-47
- [2] Капринос Д.М., ред. *Композиционные материалы. Справочник*. Киев, Наукова думка, 1985. 592 с.
- [3] Григорьев Г.А. Изотерма адсорбции для смачивания твердого тела жидкостью при иммерсионном смачивании. *Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова*, 2008, т. 3, № 5, с. 32–35.
- [4] Баданова А.К., Кутжанова А.Ж., Кричевский Г.Е., Фролова М.А. Исследование краевых углов смачивания и гистерезиса смачивания гидрофобизированных текстильных материалов. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 2015, № 3(357), с. 54–58.
- [5] Середин Л.М., Середин Б.М., Князев С.Ю. Исследование причин невоспроизводимого формирования дискретных зон избирательным смачиванием. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион, Технические науки*, 2014, № 1(176), с. 125–130.
- [6] Чикова О.А., Витюнин М.А., Овчинников Г.В., Константинов А.Н. Расслоение расплавов Sn-Cu при смачивании меди. *Расплавы*, 2012, № 4, с. 88–96.
- [7] Верховоломов В.К. О работе адгезии при смачивании твердой поверхности жидкой фазой. *Наука и мир*, 2017, № 4(44), с. 11–14.
- [8] Бесланеева З.О., Таова Т.М., Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б. Размерная зависимость краевого угла и линейного натяжения при смачивании наноклаптей поверхности подложки. *Известия РАН. Серия физическая*, 2017, т. 81, № 5, с. 669–676.

- [9] Желтухина Е.А., Галиханов М.Ф. Влияние электретирования на смачивание пленок из полистирола. *Вестник Казанского технологического университета*, 2013, т. 16, № 6, с. 90–92.
- [10] Ковтунов А.И., Мямин С.В., Чермашенцева Т.В. Исследование процессов смачивания стали алюминием при производстве слоистых композитов. *Сварочное производство*, 2011, № 3, с. 8–11.
- [11] Самсонов В.М., Трудова Л.А. Молекулярно-динамическое моделирование кинетики смачивания и растекания. *Вестник Тверского государственного университета. Сер. Физика*, 2011, № 12, с. 94–102.
- [12] Павленко А.Н., Цой А.Н., Суртаев А.С., Кузнецов Д.В., Сердюков В.С. Влияние низко-теплопроводного покрытия на динамику повторного смачивания перегретой пластины стекающей пленкой жидкости. *Теплофизика высоких температур*, 2016, т. 54, № 3, с. 393–400, doi: 10.7868/S0040364416020149
- [13] Воинов О.В., Кулиш С.М., Родионов С.Л. *Динамика смачивания твердых тел вязкими жидкостями*. Отчет о НИР/ОКР, грант № 96-01-01605-а Российского фонда фундаментальных исследований, 1996.
- [14] Алабужев А.А. Влияние неоднородности поверхности на четные моды собственных колебаний цилиндрической капли. *Математическое моделирование в естественных науках*, 2017, т. 1, с. 163–168.
- [15] Галашев А.Е. Формирование капли ртути на поверхности графена. Компьютерный эксперимент. *Коллоидный журнал*, 2015, т. 77, № 5, с. 593–602, doi: 10.7868/S0023291215040084
- [16] Краснолуцкий С.Л., Лежнев Е.В., Рудяк В.Я. Моделирование коэффициентов переноса воды методом молекулярной динамики. *Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета*, 2018, т. 21, № 1(67), с. 6–16.
- [17] Рапапорт Д.К. *Искусство молекулярной динамики*. Ижевск, ИКИ, 2012. 632 с.
- [18] Свавильный Н.Е. Динамика поведения капельной фазы в плазменных потоках, формирующихся в разрядных промежутках вакуумно-дуговых разрядов с рабочим газом аргоном. *Металлофизика. Новейшие технологии*, 2016, т. 38, № 2, с. 247–265, doi: 10.15407/mfint.38.02.0247
- [19] Бизюков А.А., Ромащенко Е.В., Середа К.Н., Чибисов А.Д., Кашаба А.Е. Динамика капельной фазы в плазме дугового разряда низкого давления. *Вестник Харьковского Университета, серия фізична «Ядра, частинки, поля»*, 2004, № 642, вып. 3(25), с. 42–61.
- [20] Илюхина М.А. *Динамика оболочечных и капельных микроструктур при акусто-вибрационном воздействии*. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 22 с.
- [21] Chalak C., Chareyre B., Darve F. DEM-simulations of unsaturated soils interpreted in a thermodynamic framework. *Particle-Based Methods III: Fundamentals and Applications – Proceedings of the 3rd International Conference on Particle-based Methods Fundamentals and Applications*, Barcelona, Spain, 2013, pp. 269–275.
- [22] Huber M., Säckel W., Hirschler M., Hassanizadeh S.M., Nieken U. Modelling the dynamics of partial wetting. *Particle-Based Methods III: Fundamentals and Applications — Proceedings of the 3rd International Conference on Particle-based Methods Fundamentals and Applications*, Barcelona, Spain, 2013, pp. 470–481.

References

- [1] Pyi Phyo Maung, Malysheva G.V. Modeling of the Kinetics of Impregnation Process in the Production of Reinforced Carbon-Fiber Reflectors for Space Antennas. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2016, no. 5, pp. 38–47 (in Russ.), doi: 10.18698/0236-3941-2016-5-38-47
- [2] *Kompozitsionnyye materialy. Spravochnik* [Composite materials. Directory]. Ed. Kaprinos D.M. Kiev, Naukova dumka publ., 1985. 592 p.
- [3] Grigor'yev G.A. Adsorption isotherm for wetting a solid with a liquid during immersion wetting. *Vestnik MITKHT im. M.V. Lomonosova*, 2008, vol. 3, no. 5, pp. 32–35 (in Russ.).

- [4] Badanova A.K., Kutzhanova A.Zh., Krichevskiy G.E., Frolova M.A. Research of Contact Angles and Wetting Hysteresis of Hydrophobized Textile Materials. *Izvestiya Vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2015, no. 3(357), pp. 54–58 (in Russ.).
- [5] Seredin L.M., Seredin B.M., Knyazev S.Yu. Issledovaniye prichin nevosproizvodimogo formirovaniya diskretnykh zon izbiratel'nykh smachivaniyem. *University news. North-Caucasian region. Technical sciences series*, 2014, no. 1(176), pp. 125–130 (in Russ.).
- [6] Chikova O.A., Vityunin M.A., Ovchinnikov G.V., Konstantinov A.N. Separation of Sn-Cu melts upon copper wetting. *Melts*, 2012, no. 4, pp. 88–96 (in Russ.).
- [7] Verkholomov V.K. About adhesion work at wetting solid surface by liquid phase. *Science and World*, 2017, no. 4(44), pp. 11–14 (in Russ.).
- [8] Beslaneyeva Z.O., Taova T.M., Alchagirov B.B., Khokonov Kh.B. The size dependence of the contact angle and line tension at wetting the surface of the substrate by nanodrop. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2017, vol. 81, no. 5, pp. 669–676 (in Russ.).
- [9] Zheltukhina E.A., Galikhanov M.F. The effect of electretion on the wetting of polystyrene films. *Herald of Kazan Technological University*, 2013, vol. 16, no. 6, pp. 90–92 (in Russ.).
- [10] Kovtunov A.I., Myamin S.V., Chermashentseva T.V. Research of wetting processes became aluminum in the production of laminated composites. *Welding International*, 2011, no. 3, pp. 8–11 (in Russ.).
- [11] Samsonov V.M., Trudova L.A. Molecular dynamics modeling of wetting and spreading kinetics. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Fizika*, 2011, no. 12, pp. 94–102 (in Russ.).
- [12] Pavlenko A.N., Tsoi A.N., Surtaev A.S., Kuznetsov D.V., Serdyukov V.S. Effect of a low-thermal-conductive coating on the dynamics of rewetting of overheated plate by falling liquid film. *High Temperature*, 2016, vol. 54, no. 3, pp. 370–376, doi: 10.1134/S0018151X16020139
- [13] Voinov O.V., Kulish S.M., Rodionov S.L. *Dinamika smachivaniya tverdykh tel vyazkimi zhidkostyami* [Dynamics of wetting solids by viscous fluids]. Research and Development Report, grant no. 96-01-01605-a of the Russian Foundation for Basic Research, 1996.
- [14] Alabuzhev A.A. The effect of surface inhomogeneity on even modes of natural vibrations of a cylindrical drop. *Matematicheskoye modelirovaniye v estestvennykh naukakh*, 2017, vol. 1, pp. 163–168 (in Russ.).
- [15] Galashev A.E. Mercury droplet formation on a graphene surface. Computer experiment. *Colloid Journal*, 2015, vol. 77, no. 5, pp. 582–591, doi: 10.7868/S0023291215040084
- [16] Krasnolutskiy S.L., Lezhnev E.V., Rudyak V.Ya. Molecular Dynamics Modeling of Water Transfer Coefficients. *Trudy Novosibirskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2018, vol. 21, no. 1(67), pp. 6–16 (in Russ.).
- [17] Rapaport D.K. *Iskusstvo molekulyarnoy dinamiki* [The art of molecular dynamics]. Izhevsk, IKI publ., 2012. 632 p.
- [18] Svavil'nyi M.Ye. Dynamics of Behaviour of the Droplet Phase in the Plasma Flows Formed in Discharge Gaps of Vacuum–Arc Discharges with Working Argon Gas. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2016, vol. 38, no. 2, pp 247–265 (in Russ.), doi: 10.15407/mfint.38.02.0247
- [19] Bizyukov A.A., Romashchenko E.V., Sereda K.N., Chibisov A.D., Kashaba A.E. Dynamics of the droplet phase in a low-pressure arc plasma. *Vestnik Khar'kovskogo Universiteta, seriya fizichna "Yadra, chastinki, polya"*, 2004, no. 642, iss. 3(25), pp. 42–61.
- [20] Ilyukhina M.A. *Dinamika obolochechnykh i kapel'nykh mikrostruktur pri akustovibratsionnom vozdeystvii*. Avtoref. Kand. Diss. [The dynamics of shell and droplet microstructures under acoustic vibration exposure. Abstract Cand. Diss.]. Moscow, 2010. 22 p.
- [21] Chalak C., Chareyre B., Darve F. DEM-simulations of unsaturated soils interpreted in a thermodynamic framework. *Particle-Based Methods III: Fundamentals and Applications – Proceedings of the 3rd International Conference on Particle-based Methods Fundamentals and Applications*, Barcelona, Spain, 2013, pp. 269–275.
- [22] Huber M., Säckel W., Hirschler M., Hassanizadeh S.M., Nieken U. Modelling the dynamics of partial wetting. *Particle-Based Methods III: Fundamentals and Applications – Proceedings of the 3rd International Conference on Particle-based Methods Fundamentals and Applications*, Barcelona, Spain, 2013, pp. 470–481.

Информация об авторе

АРИНЧЕВ Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

Information about the author

ARINCHEV Sergei Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Аринчев С.В. Моделирование динамики смачивания абсолютно жесткого бака методом частиц. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 3, с. 64–74, doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-64-74

Please cite this article in English as:

Arinchev S.V. Modelling the Dynamics of Wetting of an Absolutely Rigid Tank Using the Particles Method. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 3, pp. 64–74, doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-64-74



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет 2-е издание учебника А.А. Гурова, П.В. Слитикова, Ж.Н. Медных «Химия: теория и практика. Металлы и сплавы»

Учебник является оригинальным изданием и не имеет аналогов среди литературы по химии, используемой в учебном процессе технических университетов и вузов. По содержанию и структуре книга представляет собой совокупность учебника, задачника и практикума и состоит из трех разделов. Первый посвящен современным вопросам классификации, строения, получения и очистки металлов. Во втором разделе рассмотрены основные физические и химические свойства металлов. Третий раздел содержит материал, охватывающий сплавы и растворы в металлических системах.

Материал учебника изложен в доступной, но в то же время достаточно строгой форме. Некоторые темы в нем освещены более глубоко, чем в существующих учебниках, и, главное, методически удачнее. Приведенные на форзацах современные формы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева отражают существование проблем классификации, получения и изучения свойств некоторых элементов-металлов. Указана коррозионная стойкость большинства металлов-веществ, которая является одним из важнейших требований, предъявляемых к конструкционным металлическим материалам. Периодические системы с такой информацией в современных учебниках практически не приводились.

Учебник соответствует государственному образовательному стандарту по химии для технических направлений и специальностей и предназначен для студентов 1-3-го курсов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru