

УДК 532.61; 532.08; 533.1/.5.08; 543.54; 544.72

В.И. Волков, Е.Р. Курколуп

Экспериментальное исследование краевых углов натекания в горизонтальных коробах

Ключевые слова: диэлектрический короб, металлический короб, краевой угол натекания, длина растекания жидкости, высота слоя жидкости, треугольный короб, прямоугольный короб, коэффициент поверхностного натяжения, диэлектрическая проницаемость, смачиваемость, мениск, время релаксации, неравновесный краевой угол, подложка, коэффициент растекания, пленка жидкости, поляризуемость, удельный объем, поверхностный слой, полное смачивание.

Многие химические и химико-технологические процессы и явления связаны с растеканием жидкостей по твердым или жидким подложкам [1, с. 619; 2, с. 39]. В предлагаемой работе приведены экспериментальные исследования по растеканию жидкости в металлических и диэлектрических коробах различной формы. Внимание исследований по этой тематике было направлено в основном на изучение растекания микрокапель в целях повышения качества печатания или для повышения коэффициента теплообмена в испаряющихся тонких пленках теплообменных аппаратов. Работ по исследованию растекания макрообъемов жидкости в горизонтальных коробах найти не удалось.

Цель данной работы заключалась в изучении равновесных краевых углов натекания с помощью определения длины растекания жидкости, налитой в горизонтальный короб. Далее предполагалось получение математической оценки значений равновесных краевых углов натекания.

В работе исследовано растекание жидкости в открытых сверху коробах треугольной и прямоугольной форм (рис. 1), причем ширина d для прямоугольных коробов варьировалась от 0,002 до 0,0096 м. Короба изготавливались из стали марки ст. 45, дюралюми-

ния, стекла марки М2, полистирола, органического стекла марки ТОСП. Длина горизонтального короба составляла 0,5 м. В качестве жидкости использовались дистиллированная вода, спирт, глицерин. Все эксперименты проводились при температуре 25 ± 2 °С. Табличные значения поверхностного натяжения для воды, глицерина и спирта при температуре 25 °С были взяты следующие: 72,1; 59,2; 22,3 мН/м соответственно. Диэлектрические проницаемости исследуемых жидкостей ϵ_1 воды, глицерина и спирта составляли 80, 60 и 27, а твердых подложек из окиси металла, стекла, органического стекла и полистирола ϵ_2 – 8; 5; 3,4; 2,2 соответственно [3, с. 332; 4, с. 254].

В качестве объекта исследования для изучения краевого угла натекания был выбран открытый горизонтальный короб, в который наливалась жидкость известного объема и фиксировалась длина растекания этого объема. Было проведено несколько серий экспериментов по исследованию длины растекания жидкости, и каждая серия состояла не менее чем из семи опытов. Случайная ошибка измерения не превышала 15%. На рисунках 3–7 максимальная абсолютная ошибка обозначена вертикальным отрезком. При этом систематическая ошибка измерения объема всех исследуемых жидкостей составила $0,02 \cdot 10^{-6}$ м³. Поэтому при оценке полной ошибки как по длине растекания, так и по краевому углу, учитывалась только случайная ошибка, которая существенно превышала систематическую. При этом абсолютная случайная ошибка измерения краевого угла натекания составила $\pm 4^\circ$.

Найдем зависимость равновесных краевых углов от объема наливаемой жидкости и длины ее растекания в прямоугольных и треугольных коробах. Используя рассуждения, приведенные в задаче по растеканию

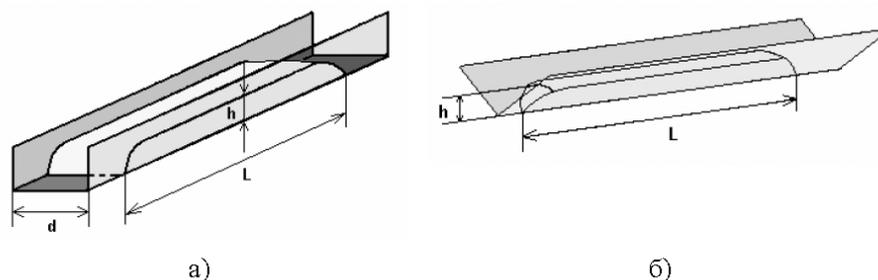


Рис. 1 Аксонометрическая проекция схемы растекания жидкости:
а) в прямоугольном коробе; б) в треугольном коробе

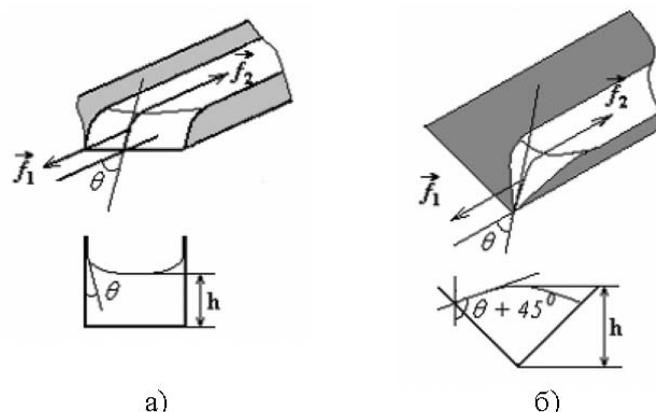


Рис. 2. Аксонометрическая проекция установки по растеканию жидкости:
а) в прямоугольном коробе; б) в треугольном коробе

жидкости на плоской горизонтальной подложке [5, с. 183], запишем равенство сил, способствующих и препятствующих растеканию жидкости в прямоугольном коробе (рис. 2 а):

$$f_1 - f_2 = f_3, \quad (1)$$

где f_1 – сила поверхностного взаимодействия на линии трехфазного контакта, способствующая растеканию жидкости; f_2 – сила поверхностного взаимодействия на границе раздела газ – жидкость, препятствующая растеканию жидкости; f_3 – разность сил гидростатического давления и давления Лапласа.

Подставляя значение для каждой силы в выражение (1), получим

$$\sigma \cdot d - (d + 2h)\sigma \cos \theta = \left(\frac{1}{2} \rho g h - \frac{\sigma \cos \theta}{d} \right) h d, \quad (2)$$

где d – ширина короба; h – высота слоя жидкости; θ – краевой угол натекания.

Анализируя выражение (2), заметим, что оно имеет смысл, начиная с критического угла натекания $\theta > \arccos\left(\frac{d}{d+h}\right)$. В наших экспериментах краевой угол натекания получался всегда больше критического значения. Выражая $\cos \theta$ из (2), получим

$$\cos \theta = \frac{1 - \frac{1}{2} \frac{\rho g}{\sigma} \left(\frac{V}{Ld} \right)^2}{1 + \frac{V}{L \cdot d^2}}. \quad (3)$$

Для треугольного короба аналогичное соотношение (1) равенство сил с учетом геометрии запишется в виде (рис. 2 б):

$$2h\sigma - 2\sqrt{2}h\sigma \cos \theta = \frac{1}{2} h^2 \left(\rho g h - \frac{\sigma \cos(\theta + \pi/4)}{h} \right). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что оно имеет смысл только при $\theta > \pi/4$. При краевом угле натекания, равном $\theta = \pi/4$, уравнение (4) имеет единственное решение с высотой слоя жидкости $h = 0$. Краевые углы натекания $\theta < \pi/4$ также соответствуют полной

смачиваемости с $h = 0$. Выражая из (4) $\cos \theta$ и учитывая, что в треугольном коробе высота слоя жидкости $h^2 \approx \frac{V}{L}$, получим выражение для равновесного

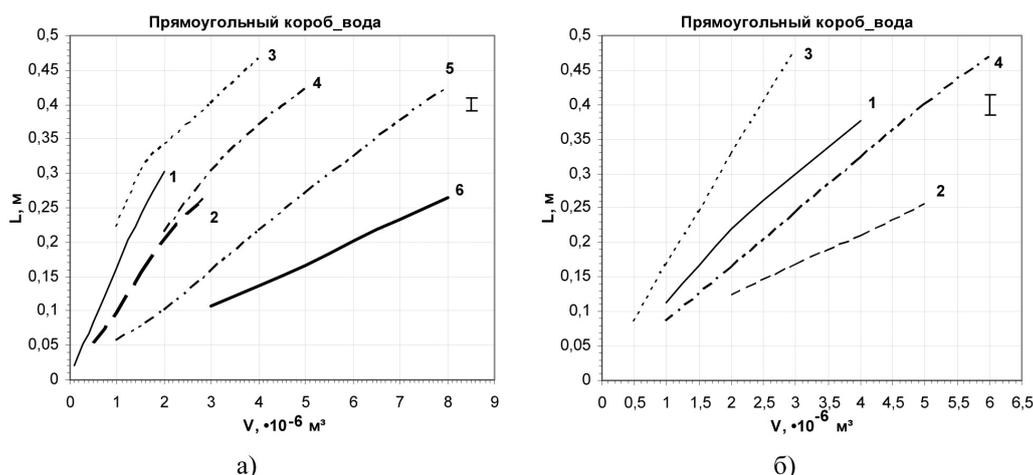
краевого угла натекания в треугольном коробе:

$$\cos \theta = \frac{3\sqrt{2}}{10} \left(2 - \frac{\rho g V}{2\sigma L} \right) + \frac{1}{10} \sqrt{10 - 2 \cdot \left(2 - \frac{\rho g V}{2\sigma L} \right)^2}. \quad (5)$$

Как показали эксперименты, функциональная зависимость длины растекания жидкости от наливаемого объема была близка к прямолинейной для всех опытов (рис. 3–5). Некоторое отличие прямолинейной зависимости длины растекания от объема наблюдалось при малых объемах, и оно, по всей видимости, связано с тем, что для малых объемов жидкости, налитой в короб, высота слоя жидкости сначала растет, а затем выходит примерно на постоянное значение для прямоугольного короба, начиная с объема $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, а для треугольного короба – с объема $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ (см. рис. 3 и 4). Для полистирола при смачивании водой наблюдалась практически линейная зависимость, начиная с объема $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, что, возможно, объясняется его плохой смачиваемостью. Высота поднятия воды в полистироловом коробе выходит на константу, начиная с самых малых объемов. Спирт хорошо растекался по всей длине в стальных прямоугольных коробах шириной 0,0024 и 0,0042 м (рис. 5 а, кривые 3, 4).

Для того чтобы получить длину растекания спирта 0,5 м в этих коробах, было достаточно всего лишь $0,18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. В стеклянных прямоугольных коробах шириной 0,002 и 0,004 м и прямоугольном коробе из дюралюминия шириной 0,002 м спирт растекался примерно одинаково и на существенно меньшую длину, чем в стальном коробе (рис. 5 а, кривые 1, 2 и 5). Еще меньше спирт растекался в прямоугольном коробе из дюралюминия шириной 0,0042 м (рис. 5 а, кривая 6).

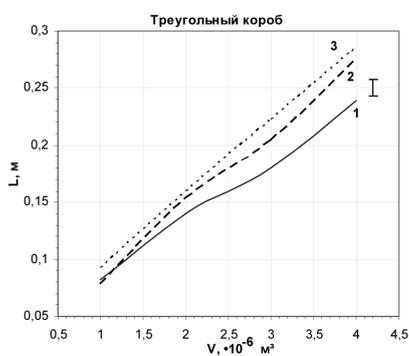
Подстановка экспериментально полученных данных по растеканию жидкости в горизонтальных коробах в выражения (3) и (5) позволила построить



- 1 – стекло, ширина короба $d = 0,002$ м;
- 2 – стекло, ширина короба $d = 0,004$ м;
- 3 – сталь, ширина короба $d = 0,0024$ м;
- 4 – сталь, ширина короба $d = 0,0042$ м;
- 5 – дюралюминий, ширина короба $d = 0,0042$ м;
- 6 – дюралюминий, ширина короба $d = 0,0096$ м

- 1 – органическое стекло, вода, ширина короба $d = 0,0022$ м;
- 2 – органическое стекло, вода, ширина короба $d = 0,0042$ м;
- 3 – полистирол, вода, ширина короба $d = 0,0017$ м;
- 4 – полистирол, вода, ширина короба $d = 0,0033$ м

Рис. 3. Графики зависимости длины растекания воды от наливаемого объема:
 а) в горизонтальных прямоугольных коробах шириной $\sim 0,002, 0,004$ и $0,01$ м, изготовленных из стекла, стали, дюралюминия; б) в горизонтальных прямоугольных коробах шириной $\sim 0,002, 0,003$ и $0,004$ м, изготовленных из органического стекла и полистирола



- 1 – стекло, вода;
- 2 – стекло, глицерин;
- 3 – дюралюминий, глицерин

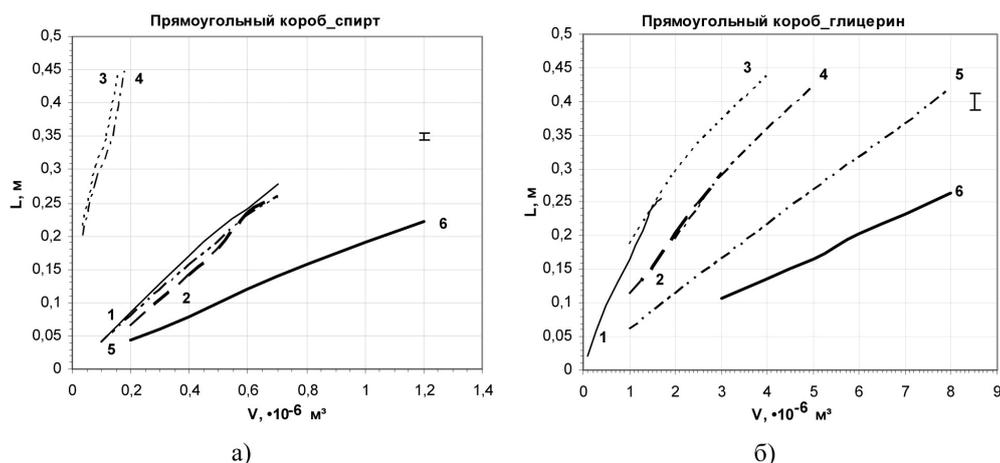
Рис. 4. Графики зависимости длины растекания жидкости от наливаемого объема в горизонтальных треугольных коробах, изготовленных из стекла и дюралюминия, для воды и глицерина

зависимость равновесного краевого угла натекания от объема и длины растекания жидкости (см. рис. 6, 7). Например, для воды и глицерина в стальном прямоугольном коробе шириной $0,0024$ м краевого угла натекания увеличился на 25° при изменении объема от $1 \cdot 10^{-6}$ до $4 \cdot 10^{-6}$ м³, а в стальном коробе шириной

$0,0042$ м краевого угла увеличивался на 10° при изменении объема от $2 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ м³. При этом краевого угла натекания в стальном прямоугольном коробе шириной $0,0024$ м для глицерина превышал 100° , а для воды достигал 90° . В стальном прямоугольном коробе шириной $0,0042$ м для глицерина краевого угла натекания не превышал 85° и для воды – 75° (см. рис. 6 а, б, кривые 3, 4).

В коробе из полистирола шириной $0,0017$ м краевого угла натекания для воды увеличивался всего на 2° при изменении объема от $0,5 \cdot 10^{-6}$ до $3 \cdot 10^{-6}$ м³, а в коробе шириной $0,0033$ м увеличение краевого угла натекания составило 4° при изменении объема от $1 \cdot 10^{-6}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ м³. Краевого угла натекания при этом достигал значения 87° и 90° соответственно (рис. 6 а, б, кривая б). Для воды в коробах из органического стекла шириной $0,0022$ и $0,0042$ м краевого угла натекания достигал 100° и 105° соответственно.

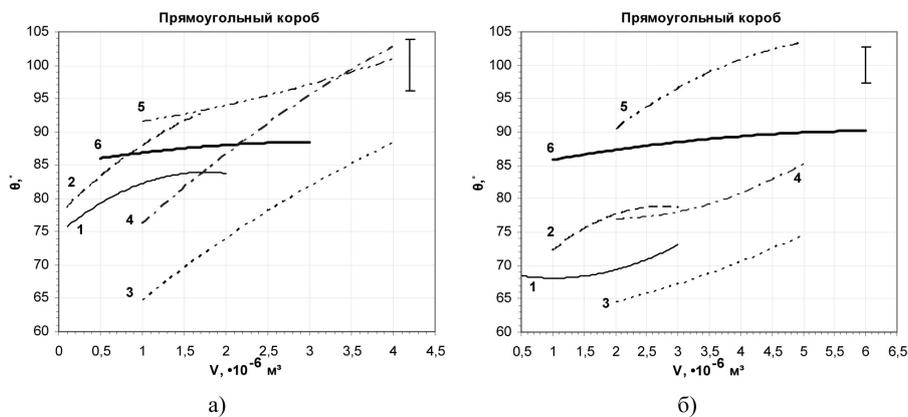
Независимые измерения краевых углов натекания были получены с помощью увеличенной теневой проекции мениска жидкости при ее капиллярном поднятии в прозрачных стеклянных цилиндрических и плоских капиллярах, подробнее эти эксперименты описаны в работе [6, с. 53, 65]. В этих экспериментах для воды в плоских капиллярах значение краевого угла натекания равно 65° для диаметра капилляра $0,002$ м. В цилиндрических капиллярах для воды значение краевого угла натекания составляло 66° , для спирта –



- 1 – стекло, ширина короба $d = 0,002$ м;
- 2 – стекло, ширина короба $d = 0,004$ м;
- 3 – сталь, ширина короба $d = 0,0024$ м;
- 4 – сталь, ширина короба $d = 0,0042$ м;
- 5 – дюралюминий, ширина короба $d = 0,002$ м;
- 6 – дюралюминий, ширина короба $d = 0,0042$ м

- 1 – стекло, ширина короба $d = 0,002$ м;
- 2 – стекло, ширина короба $d = 0,004$ м;
- 3 – сталь, ширина короба $d = 0,0024$ м;
- 4 – сталь, ширина короба $d = 0,0042$ м;
- 5 – дюралюминий, ширина короба $d = 0,0042$ м;
- 6 – дюралюминий, ширина короба $d = 0,0096$ м

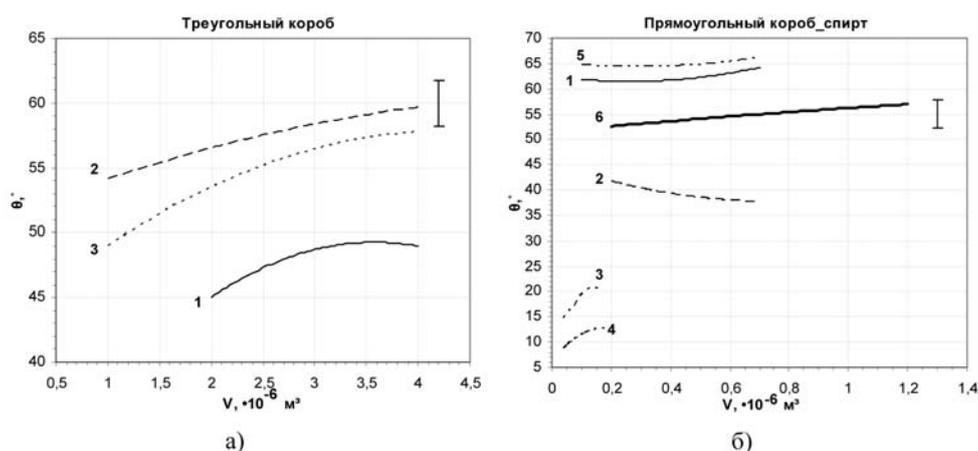
Рис. 5. Графики зависимости длины растекания жидкости от наливаемого объема:
 а) в горизонтальных прямоугольных коробах шириной $\sim 0,002$ и $0,004$ м, изготовленных из стекла, стали и дюралюминия, для спирта; б) в горизонтальных прямоугольных коробах шириной $\sim 0,002$, $0,004$ и $0,01$ м, изготовленных из стекла, стали и дюралюминия, для глицерина



- 1 – стекло, вода, ширина короба $d = 0,002$ м;
- 2 – стекло, глицерин, ширина короба $d = 0,002$ м;
- 3 – сталь, вода, ширина короба $d = 0,0024$ м;
- 4 – сталь, глицерин, ширина короба $d = 0,002$ м;
- 5 – оргстекло, вода, ширина короба $d = 0,0022$ м;
- 6 – полистирол, вода, ширина короба $d = 0,0017$ м

- 1 – стекло, вода, ширина короба $d = 0,004$ м;
- 2 – стекло, глицерин, ширина короба $d = 0,004$ м;
- 3 – сталь, вода, ширина короба $d = 0,0042$ м;
- 4 – сталь, глицерин, ширина короба $d = 0,0042$ м;
- 5 – оргстекло, вода, ширина короба $d = 0,0042$ м;
- 6 – полистирол, вода, ширина короба $d = 0,0033$ м

Рис. 6. Графики зависимости равновесного краевого угла натекания от объема наливаемой жидкости:
 а) в горизонтальных прямоугольных коробах шириной $\sim 0,002$ м; б) в горизонтальных прямоугольных коробах шириной $\sim 0,004$ м, изготовленных из стекла, стали, органического стекла и полистирола, для воды и глицерина



1 – стекло, вода;
 2 – стекло, глицерин;
 3 – дюралюминий, глицерин

1 – стекло, ширина короба $d = 0,002$ м;
 2 – стекло, ширина короба $d = 0,004$ м;
 3 – сталь, ширина короба $d = 0,0024$ м;
 4 – сталь, ширина короба $d = 0,0042$ м;
 5 – дюралюминий, ширина короба $d = 0,002$ м;
 6 – дюралюминий, ширина короба $d = 0,0042$ м

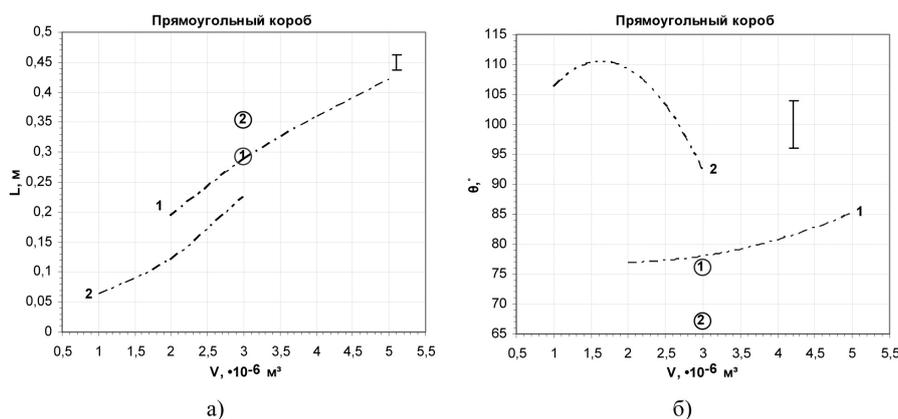
Рис. 7. Графики зависимости равновесного краевого угла натекания от объема наливаемой жидкости: а) в горизонтальных треугольных коробах, изготовленных из стекла и дюралюминия, для воды и глицерина; б) в горизонтальных прямоугольных коробах шириной $\sim 0,002$ и $0,004$ м, изготовленных из стекла, стали и дюралюминия, для спирта

68° , а для глицерина – 67° при диаметре капилляра $0,0012$ м. В наших экспериментах на стеклянных подложках значения краевых углов натекания для воды, спирта и глицерина составили 70° , 63° и 57° соответственно (см. рис. 6 б, кривая 1; рис. 7 а, кривая 2 и 7 б, кривая 1). Таким образом, независимые эксперименты по измерению краевого угла натекания показали, что для воды и спирта краевые углы натекания, полученные для вертикальных и горизонтальных капилляров, совпадали в пределах ошибки измерения. Для глицерина отличие краевых углов натекания превышало ошибку измерения, что будет объяснено в дальнейшем.

Анализ величин краевых углов натекания в зависимости от объема наливаемой в короб жидкости показал, что величина краевого угла натекания монотонно возрастает вместе с ростом объема наливаемой жидкости. По всей видимости, это связано с ростом высоты слоя жидкости в коробе. Рост высоты слоя жидкости приводит к более крутому склону поверхности жидкости на ее границе. Наименьшее изменение краевого угла натекания в зависимости от объема жидкости было получено при смачивании водой полистирола, высота поднятия которого в коробе не изменялась, начиная с малых объемов (рис. 6 а, б, кривая 6). Для спирта краевой угол натекания также менялся несущественно, в пределах 4° . Причем, наибольший рост краевого угла натекания наблюдался на глицерине в стальном прямоугольном коробе шириной $0,002$ м, в котором при изменении объема глицерина от $1 \cdot 10^{-6}$

до $4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ краевой угол натекания изменялся от 75° до 104° (рис. 6 а, кривая 4). Подобное поведение краевого угла натекания можно объяснить разным временем релаксации для получения равновесного краевого угла. Для маловязкого спирта это время релаксации мало (меньше 1 с), для глицерина, вязкость которого на три порядка больше вязкости спирта, время релаксации велико. В наших экспериментах время, после которого длина растекания не менялась, составляло: для спирта ~ 1 минута, для воды ~ 5 минут. За это время вода и спирт успевали достичь равновесного состояния, глицерин же по истечении этого времени имел неравновесный краевой угол натекания.

Для проверки этого предположения проведена серия длительных опытов по растеканию воды, спирта и глицерина в коробах в течение трех суток. Причем, для исключения влияния процесса испарения короба с жидкостями помещали в герметичные сосуды в изотермических условиях. Эксперимент показал, что длина растекания воды и спирта в коробах не зависела от длительности опыта в пределах ошибки эксперимента ($5\text{--}10\%$). Длина растекания глицерина объемом $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ в коробе из органического стекла шириной $0,0022$ м в момент заполнения составила $0,3$ м, через сутки – $0,4$ м, а еще через двое суток уже достигала полной длины короба – $0,5$ м. Поэтому дальнейшие эксперименты с растеканием глицерина в этом коробе пришлось прекратить. Для короба из органического стекла шириной $0,0042$ м длина растекания в момент



1 – сталь, глицерин, ширина короба $d = 0,0042 \text{ м}$;
 2 – органическое стекло, глицерин, ширина короба $d = 0,0042 \text{ м}$.
 Точки, обведенные кружком, соответствуют длине растекания и краевому углу натекания глицерина через трое суток: 1 – в стальном коробе; 2 – в коробе из органического стекла

Рис. 8. Графики зависимости: а) длины растекания; б) краевого угла натекания глицерина от наливаемого объема в горизонтальном прямоугольном коробе шириной $0,0042 \text{ м}$, изготовленном из органического стекла

заполнения составила $0,22 \text{ м}$, а через трое суток – $0,36 \text{ м}$, и в дальнейшем практически не изменялась (рис. 8). Длина растекания $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ глицерина в стальном коробе шириной $0,0042 \text{ м}$ в момент заполнения составила $0,23 \text{ м}$, через сутки достигала постоянного значения – $0,3 \text{ м}$, и в дальнейшем не изменялась.

В проведенных исследованиях использовались два вида поверхностей твердого тела: высокоэнергетическая поверхность металла, покрытая окисной пленкой с поверхностной энергией от $0,5$ до 5 Дж/м^2 , и низкоэнергетические диэлектрики с поверхностной энергией около $0,05 \text{ Дж/м}^2$ [1, с. 624]. Судя по зависимости длины растекания спирта от объема, налитой в короб жидкости, полное смачивание металлической подложки не наблюдалось. Запишем коэффициент растекания S , приближенно выразив поляризуемость диэлектрика через соответствующие диэлектрические проницаемости полярной жидкости (ϵ_1), диэлектрической подложки (ϵ_2), и коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и газом (σ) [1, с. 625]:

$$S = k(\epsilon_1 - 1)(\epsilon_2 - 1) - 2\sigma \quad (6)$$

Из этого соотношения можно заключить, что для диэлектрических проницаемостей много больше 1 коэффициент растекания пропорционален произведению соответствующих диэлектрических проницаемостей за вычетом удвоенного значения коэффициента поверхностного натяжения жидкости на границе с газом. Привлекательность этого коэффициента растекания связана с наличием слагаемого, отвечающего за взаимодействия с поверхностью твердого тела. По всей видимости, от этого коэффициента должна зависеть и высота капиллярного поднятия, получаемая из формулы Лапласа, в которой взаимодействие жидкости с поверхностью учитывается через краевой угол.

С другой стороны, возможно, в этом коэффициенте растекания содержится более полный ответ на вопрос о физической природе гистерезиса смачивания, которая обусловлена не только наличием шероховатостей на поверхности твердого тела, граничащего с жидкостью. При натекании жидкости на линии трехфазного контакта пленка жидкости только начинает формироваться, и в полярных взаимодействиях между жидкостью и твердой поверхностью преимущественно участвует жидкость и несмоченный материал подложки. Предварительное смачивание полярной жидкостью подложки увеличивает ее поляризуемость и соответствующее взаимодействие между жидкостью и подложкой, приводя к большему коэффициенту растекания.

Сформируем из (6) безразмерный коэффициент: $k(\epsilon_1 - 1)(\epsilon_2 - 1)/\sigma$. Расчет величины k требует детальных знаний молекулярной структуры поверхности, провести его не удастся, поэтому для разных жидкостей и материалов подложки пока можно сравнивать только множители перед коэффициентом k . Так, для полистирола и глицерина отношение $(\epsilon_1 - 1)(\epsilon_2 - 1)/\sigma = 0,77$ (в системе СГС) имеет самое маленькое значение, несколько больше для полистирола воды и спирта – $1,32$ и $1,42$. Самое большое значение этого коэффициента для окиси металла и спирта – $8,27$, и несколько меньше для окиси металла и воды – $7,68$. С одной стороны, полученные значения этого отношения качественно отражают приведенную на рисунках 3–5 и 8 а экспериментальную зависимость длины растекания от объема. С другой стороны, требуют объяснения факты расслоения кривых для растекания спирта в дюралюминиевых коробах разной ширины (см. рис. 5 а, кривые 5, 6) и практическое слияния этих кривых с гораздо большей длиной

растекания для той же объемов жидкости в стальных коробах шириной 0,0024 и 0,0042 м (см. рис. 5 а, кривые 3, 4). Аналогичная ситуация наблюдалась и при растекании воды в дюралюминиевых и стальных коробах. По всей видимости, на диэлектрическую проницаемость поверхностной пленки окиси металла влияет как состав пленки, так и ее строение. Если пленка окиси двух- и трехвалентного железа и соответствующих гидроксидов имеет более рыхлое строение, то в такую рыхлую структуру могут внедряться полярные молекулы воды и спирта, которые увеличивают диэлектрическую проницаемость поверхностного слоя, граничащего с жидкостью. Пленка окиси дюралюминия имеет более компактное строение, внедрение в поверхностный слой полярных молекул жидкости затруднено, что и сказывалось на меньшем значении длины растекания для одинаковых объемов жидкости в дюралюминиевых и стальных коробах.

Из сравнения экспериментов по растеканию в прямоугольном и треугольном коробах можно сделать следующие выводы: в треугольном коробе объем, приходящийся на единицу смоченной площади, больше, чем в прямоугольных коробах, что приводит к большему растеканию по смоченной поверхности и к меньшему краевому углу натекания. Так, при смачивании водой стеклянных коробов треугольной формы объем, приходящийся на единицу смоченной

поверхности (удельный объем), для объема $2 \cdot 10^{-6}$ м³ равен 0,0013 м при краевом угле 45°. Для этого же объема воды удельные объемы для прямоугольных коробов шириной 0,002 и 0,004 м составили 0,0008 и 0,0011 м соответственно при краевых углах 82° и 69°. Аналогичная ситуация наблюдалась и при растекании глицерина в треугольных и прямоугольных коробах (см. рис. 3–7).

Как было показано выше, в треугольном и прямоугольном коробах существуют предельные краевые углы натекания, ниже которых наступает полное смачивание, и жидкость растекается по всему коробу в виде пленки. Для треугольного короба этот угол равен 45°, поэтому не удалось провести эксперименты на спирте в треугольном коробе, так как краевой угол натекания у спирта оказался меньше 45°. Полного смачивания спиртом подложки в прямоугольных коробах обнаружено не было.

Таким образом, в результате исследования:

- 1) экспериментально установлены длины растекания воды, спирта и глицерина в горизонтальных диэлектрических и металлических коробах в зависимости от объема наливаемой в короб жидкости;
- 2) исследовано влияние диэлектрической проницаемости на длину растекания воды, спирта и глицерина в прямоугольных и треугольных коробах;
- 3) получена математическая зависимость равновесного краевого угла натекания жидкости в горизонтальных треугольном и прямоугольном коробах.

Библиографический список

1. Жен, П.Ж. де. Смачивание: статика и динамика / П.Ж. де Жен // Успехи физических наук. – 1987. – Т. 151. – Вып. 4.
2. Тарасов, О.А. Фестонная нестабильность капли летучей нерастворимой жидкости, помещенной на поверхность другой жидкости, при охлаждении испарением / О.А. Тарасов, Н.А. Горбачева // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33. – Вып. 4.
3. Физические величины : справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М., 1991.
4. Рабинович, В.А. Краткий химический справочник : справ. изд. / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин ; под ред. А.А. Потехина и А.И. Ефимова. – 4-е изд. – СПб., 1994.
5. Гинзбург, В.Л. Сборник задач по общему курсу физики. Термодинамика и молекулярная физика / В.Л. Гинзбург, Л.М. Левин, Д.В. Сивухин, И.А. Яковлев. – М., 1976.
6. Лескова, С.С. Диагностика свойств жидкости на границах раздела гетерогенных сред : дис. ... канд. физ.-мат. наук / С.С. Лескова. – Барнаул, 2006.