

ния по подтверждению полученных зависимостей. В теоретическом плане необходимо учесть влияние виброожижения материала на время ударного взаимодействия.

**Список литературы:** 1. Франчук В.П. Конструкция и динамический расчет вибрационных мельниц / В.П. Франчук // Техника и технология обогащения руд. – М: Недра, 1995. – С. 143 – 160. 2. Анциферов А.В. Экспериментальное исследование поведения многомассной системы внутри камеры с вертикальным направлением вибрации / А.В. Анциферов // Вісник НТУ«ХП». – 2006. – № 30. – С. 42 – 49. 3. Анциферов А.В. Симметричная двухмассная модель помольной камеры МВВ / А.В. Анциферов // Вибрации в технике и технологиях. – 1998. – № 4 (8). – С. 55 – 57. 4. Александров Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.В. Александров, В.Б. Соколински . – М.: «Наука», 1969. – 197 с. 5. Анциферов А.В. Экспериментальное исследование соударения тел через слой порошкового материала / А.В. Анциферов, И.В. Комарова // Вісник НТУ «ХП». – 2010. – № 66. – С. 58 – 63.

*Поступила в редколлегию 26.07.11*

УДК 532.5.536.2

**В.П. НАДУТЫЙ**, докт. техн. наук, зав. отделом, ИГТМ НАНУ  
**В.И. ЕЛИСЕЕВ**, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотруду., ДНУ  
**В.И. ЛУЦЕНКО**, канд. техн. наук, ст. научн. сотруду., ИГТМ НАНУ  
**И.П. ХМЕЛЕНКО**, канд. техн. наук, мл. научн. сотруду.,  
ИГТМ НАНУ, Днепропетровск

## **ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА СТАТИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ МЕНИСКА ДВИЖУЩЕЙСЯ В КАПИЛЛЯРЕ ЖИДКОСТИ**

Розглянута задача впливу низькочастотних вібрацій на рух рідини в капілярі із шорсткуватими стінками. Отримано, що енергія коливань допомагає мениску рідини переборювати мікроскопічні перешкоди і після закінчення руху мениск займає положення близьке до положення, що відповідає рівноважному куту змочування. Показана можливість резонансного збудження мениска в капілярі при коливаннях рідини.

Рассмотрена задача воздействия низкочастотных вибраций на движение жидкости в капилляре с шероховатыми стенками. Получено, что энергия колебаний помогает мениске жидкости преодолеть микроскопические преграды и по окончании движения мениск занимает положение близкое к положению, что соответствует равно-важно углу смачивания. Показана возможность резонансного возбуждения мениска в капилляре при колебании жидкости.

The problems of influence of low-frequency vibrations on the motion of fluid in a capillary with a rough wall surface to have been considered. It was found that the oscillation energy of the liquid meniscus helps to overcome the microscopic obstacles. Position of the meniscus after movement corresponds to the equilibrium angle of wetting. Resonant excitation of the meniscus in the capillary during vibration of the liquid are possible.

**Введение.** Изучение капиллярных явлений, несмотря на значительную свою историю, привлекает внимание исследователей и в настоящее время. В большой степени это связано с различными технологическими потребностями, такими как обезвоживание, пропитка, сушка, вытеснение одной жидкостью другой и др.

Помимо важных практических задач до сих пор остается нерешенной классическая задача о движении мениска по капиллярному каналу. Так как поровой канал в пористой среде часто представляется в виде обычного осесимметричного канала, то эта задача имеет как теоретическое, так и практическое значение. Значительный интерес к этой задаче обусловлен наличием гистерезисов смачивания. Согласно современным представлениям [1, 2] явление гистерезиса связано с отличием углов смачивания в динамических условиях от их равновесных значений, определяемых уравнением Юнга.

Краевые углы формируются под действием различных межфазовых и динамических сил и зависят от направления движения, вследствие чего носят названия углов натекания и оттекания.

Однако, как отмечается в [3] для чистых жидкостей и гладких поверхностей можно добиться отсутствия гистерезиса.

В случае, если поверхность твердого тела шероховата, возникновение гистерезиса практически неизбежно.

В работах [4, 5], явление гистерезиса представлено как неоднозначность решения соответствующих уравнений. Такая трактовка, не объясняет полностью явления гистерезиса смачивания, но наглядно показывает роль неровностей поверхности канала в появлении множественности решений при определении статических положений мениска в капилляре.

В этих работах было показано, что даже в случае постоянства угла смачивания к статическим гистерезисным явлениям приводят небольшие геометрические изменения капиллярного канала (макроуровень), а также изменение шероховатости поверхности (микроуровень). В зависимости от предыстории движения мениск может занять то или иное место в капиллярной трубке с шероховатыми стенками.

На положение мениска могут оказывать влияние и дополнительные возмущения, такие, как колебания жидкости или капилляра. В данной работе показано, какое влияние на местоположение мениска могут оказывать низкочастотные колебания.

**Постановка задачи. Основные уравнения.** Будем рассматривать движение столба жидкости под действием капиллярных и массовых сил в узком канале, нижний конец которого опущен в жидкость, находящуюся в емкости, а верхний открыт и находится под атмосферным давлением. Колебания (будем рассматривать вертикальные) могут накладываться, как на капиллярную трубку, так и на емкость с жидкостью. Уравнение движения мениска, выведенное из гидродинамических уравнений движения жидкости, имеет вид [4]

$$h \left( \frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{dU_c}{dt} \right) + gh + 8 \frac{\mu}{\rho R_c^2} h \frac{dh}{dt} - 2 \frac{\sigma}{R_c} \frac{\theta}{(1 + \theta^2)^{1/2}} = p_0 - p_a, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $h$  – высота слоя в трубке;  $U_c$  – скорость движения капиллярной трубки;  $R_c$  – радиус капилляра;  $\rho$  – плотность жидкости;  $p_0$  – давление на нижнем конце трубки;  $p_a$  – атмосферное давление;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\theta = 1/\text{tg} \varphi$ ,  $\varphi$  – угол смачивания.

Для неподвижного капилляра член  $dU_c/dt = 0$ . Давление у нижнего края капилляра  $p_0$  будем находить из решения задач о колебаниях жидкости в емкости, в которой находится капилляр. Рассмотрим два варианта: первый – капилляр неподвижен, колеблется дно емкости; второй – емкость с жидкостью неподвижна, колеблется капилляр.

Принимая движение жидкости в емкости потенциальным, выпишем уравнение движения в безразмерных величинах в неподвижной системе координат:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} + \left( \frac{h_*}{R_s} \right)^2 \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta^2} + \frac{\partial \Phi}{\eta \partial \eta} \right) = 0, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – потенциал, ( $u = \partial \Phi / \partial x$  – скорость вдоль оси  $x$ ,  $v = \partial \Phi / \partial r$  – скорость вдоль оси  $r$ ),  $R_s$  – радиус емкости,  $\xi = x/h_*$ ,  $\eta = r/R_s$ .

Привлекая для решения уравнения (2) функции Бесселя для давления  $p_0$  в линейном приближении для случая колебаний дна емкости получим следующее выражение:

$$p_0 = p_a + \rho g(H - h_*) - \rho A \frac{dU_S}{dt} + \rho B \frac{d^2 h}{dt^2}, \quad (3)$$

$$\text{где } A = h_* + \frac{P_2}{1 - \varepsilon_2}, \quad B = P_1 + \frac{\varepsilon_1 P_2}{1 - \varepsilon_2}, \quad P_1 = \sum_k C_k \eta_1 \left. \frac{dJ_0}{d\eta} \right|_{\eta_1}, \quad P_2 = \sum_k C_k \eta_2 \left. \frac{dJ_0}{d\eta} \right|_{\eta_2},$$

$$C_k = R_S \frac{1}{\gamma_k^3 \int_0^1 \eta J_0^2 d\eta} \frac{1 + \exp(-2\gamma_k h_* / R_S)}{[1 - \exp(-2\gamma_k h_* / R_S)]}, \quad \eta_1 = R_C / R_S,$$

$\eta_2 = R_T / R_S$ ,  $\varepsilon_1 = R_C^2 / R_S^2$ ,  $\varepsilon_2 = R_T^2 / R_S^2$ ,  $R_T$  – внешний радиус капиллярной трубки,  $h_*$  – расстояние между дном емкости и нижним сечением капилляра.

Для колеблющегося капилляра будем иметь:

$$p_0 = p_a + \rho g(H - h_*) + \rho A \frac{dU_C}{dt} + \rho B \left( \frac{dU_C}{dt} + \frac{d^2 h}{dt^2} \right), \quad (4)$$

$$A = \frac{1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1 - \varepsilon_2} P_2, \quad B = (1 + \varepsilon_1) \left( P_1 + \frac{\varepsilon_1 P_2}{1 - \varepsilon_2} \right), \quad P_1 = \sum_k C_k \eta_1 \left. \frac{dJ_0}{d\eta} \right|_{\eta_1},$$

$$P_2 = \sum_k C_k \eta_2 \left. \frac{dJ_0}{d\eta} \right|_{\eta_2}.$$

**Результаты расчетов.** Результаты расчетов приведены на рис. 1 и рис. 2.

В расчетах принималось: радиус капилляра  $R_c = 0,225$  мм, амплитуда колебаний – 1 мм, частота  $f = 40$  Гц. Эффективный угол смачивания в соответствии с [6] принимался равным:

$$\text{Cos} \alpha_s = K \cdot \text{Cos} \alpha, \quad (5)$$

где  $K=S/S_s$  – коэффициент шероховатости,  $S$  – площадь гладкой поверхности,  $S_s$  – площадь шероховатой поверхности.

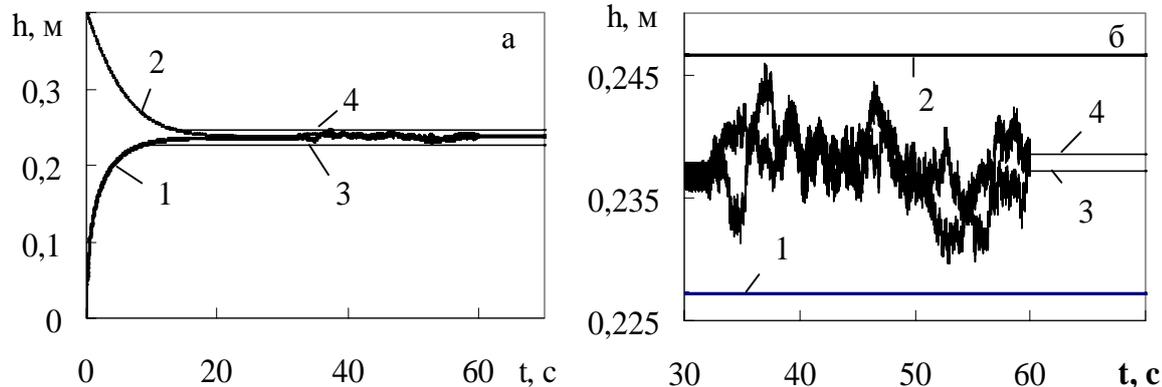


Рис. 1. Влияние колебаний капилляра на положение мениска жидкости: 1, 3 – поднятие ( $h_0=0$  м); 2, 4 – опускание ( $h_0=0,4$  м); 1, 2 – без колебаний; 3, 4 – с колебаниями ( $A = 1 \cdot 10^{-3}$  м,  $f = 40$  Гц)

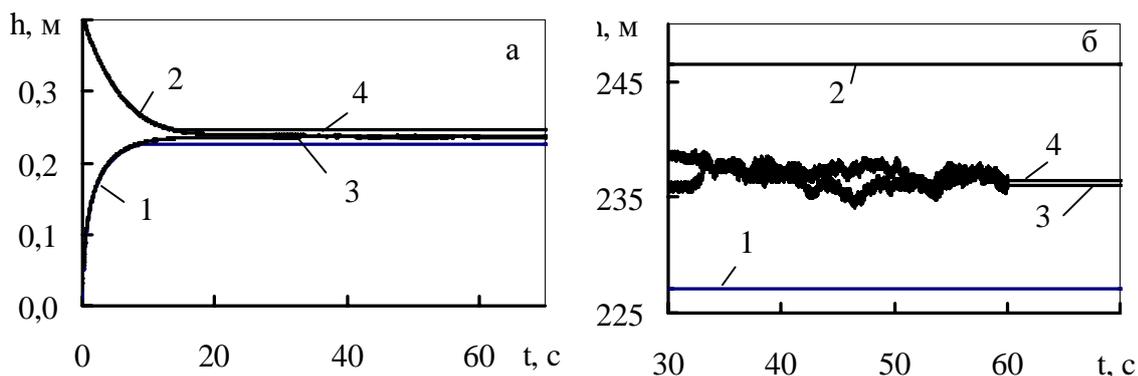


Рис. 2. Влияние колебаний жидкости на положение мениска в капилляре: 1, 3 – поднятие ( $h_0=0$  м); 2, 4 – опускание ( $h_0=0,4$  м). 1, 2 – без колебаний; 3, 4 – с колебаниями ( $A = 1 \cdot 10^{-3}$  м,  $f=40$  Гц)

Коэффициент шероховатости задавался равным:

$$K = 1 - A(1 - \sin(2\pi\kappa x/R_c)), \quad (6)$$

где  $A$  – амплитуда принималась равной 0,2; а частота  $\kappa = 1$ , при этом угол смачивания  $\alpha$  считался постоянным и равным  $\pi/4$ .

На рис. 1, 2 показаны кривые подъема (1, 3) и опускания (2, 4) в капилляре при колебании дна емкости с неподвижным капилляром (рис. 1) и колебании капилляра (рис. 2) при неподвижной жидкости.

Цифрами 1, 2 обозначены кривые подъема и опускания соответственно для случая движения мениска без колебаний (нижний конец трубки опущен в воду на 0,2 м, т.е. поверхность жидкости находится на отметке 0,2 м).

Из рисунков видно, что при опускании и подъеме жидкости без колебаний ее мениск останавливается в разных положениях. При этом разница в высотах составляет примерно 20 мм. При наличии колебаний положения менисков значительно сближаются. Это хорошо видно на соответствующих рисунках (б), где прямые представляют положения менисков без колебаний (кривые 1, 2).

На шестидесятой секунде возмущения отключались, и мениски занимали статическое положение внутри области, ограниченной кривыми 1, 2. При этом хорошо видно, что разница в граничных положениях мениска значительно меньше. В рассматриваемом конкретном случае она составляет примерно 2 мм. Таким образом, колебания уменьшают действие шероховатости стенок и практически убирают гистерезисы.

Расчеты, проведенные для спирта, показали аналогичное поведение с тем лишь отличием, что разность между кривыми соответственно 1, 2 и 3, 4 меньше, чем для воды.

Это в какой-то мере подтверждает известный экспериментальный факт, что при лучшей смачиваемости порядковый гистерезис сужается.

В настоящее время известно, что углы натекания и оттекания значительно отличаются друг от друга (в работе [6] они измерены и представлены как максимальный и минимальный углы), причем при остановке движения они могут практически не релаксировать в равновесный, что является еще одной особенностью гистерезиса смачивания.

Из полученного решения следует важный вывод – энергия колебательного движения жидкости помогает мениску преодолевать микроскопические препятствия и занять место, соответствующее его равновесному углу смачивания или, по крайней мере, близкое к нему.

В реальных процессах мениск жидкости находится в колебательном движении и деформируется, при этом на поверхности могут образовываться (в зависимости от диаметра капилляра, частоты и амплитуды колебаний) струйки, которые могут оказать влияние на высоту подъема или опускания слоя. В работах [7, 8] авторы вводят понятие гармонической неустойчивости поверхности маловязкой жидкости в вертикально колеблющемся сосуде. Это явление связано с параметрическим возбуждением стоячих трехмерных волн,

при котором их собственная частота близка к вынужденной частоте колебания сосуда. Согласно результатам этих работ для нарастания амплитуды колебаний поверхности необходимо условие

$$R_- < \Omega / \omega < R_+, \quad (7)$$

где  $\Omega$  – вынужденная частота колебания сосуда;  $\omega$  – частота колебаний поверхности;  $R_{\pm} = 1 + \Delta\omega / \omega - 1/12 (s\Omega^2 / g)^2 \pm [1/64 (s\Omega^2 / g)^4 - (\Delta\omega / \omega)]^{1/2}$  – границы неустойчивости;  $\Delta\omega = -2^{-1,5} \nu^{0,5} g^{-1} \omega^{2,5} I_S / I_{\Sigma}$  – сдвиг собственной частоты колебаний идеальной жидкости;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $I_S, I_{\Sigma}$  – интегралы по поверхностям жидкости и сосуда [7, 8].

Формула (7) дает выражения для частот, на которых возможно нарастание амплитуды поверхностных волн вблизи задающей частоты  $\Omega$  при данной амплитуде колебаний. Сама величина амплитуды должна превышать некоторое пороговое значение, т.е. должно выполняться условие:

$$(s\omega^2)^2 / 8g^2 \geq |\Delta\omega| / \omega. \quad (8)$$

Если воспользоваться этим условием, то для границ неустойчивости получим выражения

$$R_{\pm} = 1 - 1/8 (s_* \omega^2 / g)^2 - 1/12 (s_* \Omega^2 / g)^2 \pm 1/8 [(s_* \Omega^2 / g)^4 - (s_* \omega^2 / g)]^{1/2} \quad (9)$$

Проведенные оценки по этим формулам показали, что для пороговой амплитуды колебаний  $s_* = 1$  мм при относительно высоких частотах  $\Omega = 100 - 200$  Гц выполняется условие (7), т.е. при таких условиях возможно резонансное явление в капиллярной трубке.

Наконец, в [9] численно показано, что неустойчивость волны на поверхности приводит при определенных условиях к образованию кумулятивных струй. Нами экспериментально были зафиксированы всплески на поверхности мениска, что, совместно с приведенными теоретическими оценками показывает на возможность существования еще одного явления – резонансного возмущения мениска в капиллярах при колебаниях жидкости.

**Список литературы:** 1. Сумм Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с. 2. Сумм Б.Д. Гистерезис смачивания / Б.Д. Сумм // СОЖ. – 1999. – № 7. – С. 98 – 102. 3. Адамсон А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. – М.: Мир, 1979. – 568с. 4. Eliseyev V.I. The phenomena of the hysteresis in capillaries / V.I. Eliseyev, V.I. Lutsenko., V.F. Prisiakov // Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources: VII Minsk International Seminar. – Minsk, 2008. – P. 388 – 394. 5. Елисеев В.И. Влияние шероховатости на движение жидкости в капилляре / В.И. Елисеев, В.И. Луценко, Н.П. Анфимова // Геотехническая механика: межвед. сборник научн. трудов. – 2008. – Вып. 74. – С. 54 – 61. 6. Волков В.И. Экспериментальное исследование гистерезиса смачивания / В.И. Волков, С.С. Лескова, Е.Р. Кирколуп // Физика. – С. 106 – 110. 7. Кравцов А.В. Параметрическое возбуждение колебаний вязкой двухслойной жидкости в замкнутом сосуде / В.И. Волков, С.С. Лескова, Е.Р. Кирколуп // ЖВММФ. – 1993. – Т. 33, № 4. – С. 611 – 619. 8. Калиниченко В.А. Гармоническая неустойчивость поверхности маловязкой жидкости в вертикально колеблющемся сосуде / [В.А. Калиниченко, А.В. Кравцов, Р. Родригес-Мижангес и др.] // ПММ. – 2000. – Т. 64, Вып. 2. – С. 285 – 292. 9. Петров А.Г. Расчет нестационарных волн на поверхности тяжелой жидкости конечной глубины / А.Г. Петров, А.П. Смолянин // ПММ. – 1993. – Т. 57, Вып. 4. – С. 137 – 143.

*Поступила в редколлегию 30.06.11*

УДК 556.388

**И.В. УДАЛОВ**, канд. тех. наук, доц., ХНУ им. Каразина,  
**А.В. ЧУБАРЬ**, аспирант, ХНУ им. Каразина

## **ЕКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОГЕННОГО КАРТООБРАЗОВАНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ г. СЛАВЯНСК**

В статті проаналізовано причини виникнення техногенного карсту. На прикладі м. Славянськ розглянуто соляний карст та наслідки його утворення. Наведено прогноз щодо динаміки розвитку техногенного карсту та його проявів.

В статье проанализированы причины возникновения техногенного карста. На примере г. Славянск рассмотрен соляной карст и последствия его образования. Приведен прогноз относительно динамики развития техногенного карста и его проявлений.

The paper analyzes the causes of anthropogenic karst. In the example of Slaviansky considered salt karst formation and its consequences. An outlook on the dynamics of technological development of karst and its manifestations.