АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 1, с. 56–60

УДК 532.685

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВИБРАЦИИ

© 2002 г. Ю. М. Заславский

Институт прикладной физики РАН
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова 46
Тел.: (8312)384284 Факс. (8312)365972
E-mail: zaslav@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 10.07.2000 г.

В работе обсуждаются результаты лабораторных экспериментов по исследованию зависимости скорости поступательного движения мелких капель, находящихся в капилляре, от уровня и частоты вибрации, воздействующей на систему капля–капилляр совместно со статическим силовым полем. Результаты представлены в виде семейства графиков, демонстрирующих своеобразные нелинейно-механические особенности рассматриваемой системы. Эксперименты подтверждают ранее предложенную теоретическую модель [7], в основу которой положен гистерезисный характер зависимости сил поверхностного натяжения от скорости движения мениска.

Механизмы вибрационного воздействия на флюидосодержащие пористые среды, приводящего к эффектам конвекции или фильтрации жидких компонентов, активно обсуждаются в литературе в связи с практическими задачами повышения эффективности отбора углеводородов из земных недр и некоторыми технологическими задачами. Как правило, исследуются наиболее распространенные случаи полностью насыщенной жидкостью среды. Повышенный интерес вызывает исследование процессов, связанных с контактом двух или нескольких жидких фаз, отличающихся смачиваемостью скелета, а также анализ влияния газовой фазы на протекание по порам [1–6].

В данной работе описывается эксперимент, демонстрирующий характерные эффекты, возникающие при совместном статическом силовом и низкочастотном вибрационном воздействии на систему капля–капилляр, при этом используется стеклянная капиллярная трубка, внутри которой располагается капля жидкости, окруженная по обе стороны воздушной средой. Таким образом моделируется влияние фактора поверхностного натяжения, действующего в области менисков, разделяющих жидкие фракции, разнородные по типу и степени смачиваемости в капиллярах пористых сред.

В работе [7] были выполнены теоретические исследования динамики находящихся в цилиндрическом капилляре мелких капель при обоих типах указанных воздействий. На основе упрощенной модели, эквивалентной системе капля–капилляр, было выведено уравнение движения мелкой капли, частично смачивающей стенки, причем его решение позволяет установить возможность возникновения сложного характера перемещений ее центра масс, т.е. предсказать различные специфические режимы движения. В указанной работе основное внимание уделяется особенностям, связанным с силами поверхностного натяжения, действующими в области менисков капли и приводящими к эффектам, обычно наблюдаемым в системах с сухим – кулоновским–трением [8]. Так, при наличии вибрации имеет место понижение уровня силового воздействия, вызывающего срыв капли с положения равновесия, относительно соответствующей величины статического силового порога в ее отсутствии, что является одной из таких особенностей. Сюда же относится обнаруженное экспериментально некоторое различие зависимостей поступательной скорости капли от амплитуды вибрации в случае увеличения ее уровня относительно случая снижения, когда область перестройки затрагивает пороговое значение силового воздействия, отвечающее либо срыву неподвижной капли с положения равновесия, либо остановке капли, ранее движущейся поступательно. Отметим, что отличающимися являются сами пороговые значения, как это будет видно из графиков экспериментальных зависимостей, представленных далее. Дополнительно к этому можно отметить, что существуют и некоторые другие экспериментальные данные, не описывающиеся упрощенной моделью, что свидетельствует о возможном наличии еще не вскрытых физических механизмов, вызывающих усложнение в поведении рассматриваемой динамической системы.

Поэтому представляет интерес более детально изложить наблюдаемые в эксперименте характерные особенности, в частности, зависимость поступательной скорости капли от частоты

вибрации при фиксированной амплитуде, либо от амплитуды при неизменной частоте, причем область низких звуковых частот является наиболее интересной.

Эксперименты по исследованию влияния вибровоздействия проведены на вибростенде (RFT DDR), на котором колебательное ускорение контролировалось измерительным акселерометром КВ-10 (RFT DDR), причем интервал перестройки ее амплитуды составил 0–30 м/с^2, а диапазон частот 10–100 Гц. Статической силой служит либо скатывающая сила собственной тяжести при вертикальном положении капиллярной трубки, либо сила избыточного воздушного давления, подаваемого с одной стороны горизонтально ориентированного капилляра и контролируемого жидкостным манометром. Для обеспечения скорости поступательного движения, например, порядка нескольких сантиметров в секунду для капли воды длиной 5–10 мм в капилляре с внутренним диаметром ~1 мм требуется поддерживать перепад всего в ~20 мм высоты водного столба. Примерно те же средние значения скорости "течения" капли имеют место под действием скатывающей силы собственного веса при ее срыве с положения равновесия. Два типа жидкости апробированы в экспериментах – это дистиллированная вода и 50% водный раствор глицерина, причем в капилляре с вертикальной ориентацией, где вес является внешней статической силой, использована жидкость второго типа, а первый из упомянутых – при пневмовоздействии. Следует указать также, что во избежание искажающего влияния поверхностной пленки, которая при каждом предыдущем эксперименте выстилает вслед за движущейся каплей частично или полностью внутреннюю поверхность канала, предприняты меры, исключающие возможность появления указанной пленки, так что измерения проведены в условиях "чистой" внутренней стенки капилляра. Отметим, что визуально обнаруживаемый эффект появления пленки тем более ощутим, чем более высокие скорости движения капли имеют место, при которых все существеннее осаждается, т.е. расходуется или теряется ее масса, поэтому допустимые в эксперименте скорости поступательного движения поддерживались не выше 3–4 см/с.

Рассмотрим данные экспериментов с капелькой 50% водного раствора глицерина, которая вначале удерживается в равновесии, а после включения вибростенда, при условии превышения уровнем вибрации определенного порога, приходит в движение с некоторой поступательной скоростью, зависящей от ее амплитуды и частоты под действием указанных факторов веса и вибрации. В данной серии измерений вибростенд осуществляет вертикально поляризованные колебательные ускорения трубки-капилляра, установленного на его платформе со строго вертикальной ориентацией продольной оси. На рис. 1 представлено семейство кривых *1–6*, показывающих результат воздействия с частотой 20, 30, 40, 50, 60 и 70 Гц. Отметим, что горизонтальная ось на графике соответствует величине виброперегрузки, фиксируемой с помощью измерительного акселерометра (КВ-10) чувствительностью – 1 мВ/м/с^2, а вертикальная – величине поступательной скорости. Регистрация последней осуществляется традиционным способом временной засечки по секундомеру интервала времени, затраченного движущейся каплей при прохождении ею эталонного отрезка пути. Оценки показывают, что разброс экспериментальных точек по вертикали вследствие погрешности измерения здесь не превышает величины 0.25 см/с.

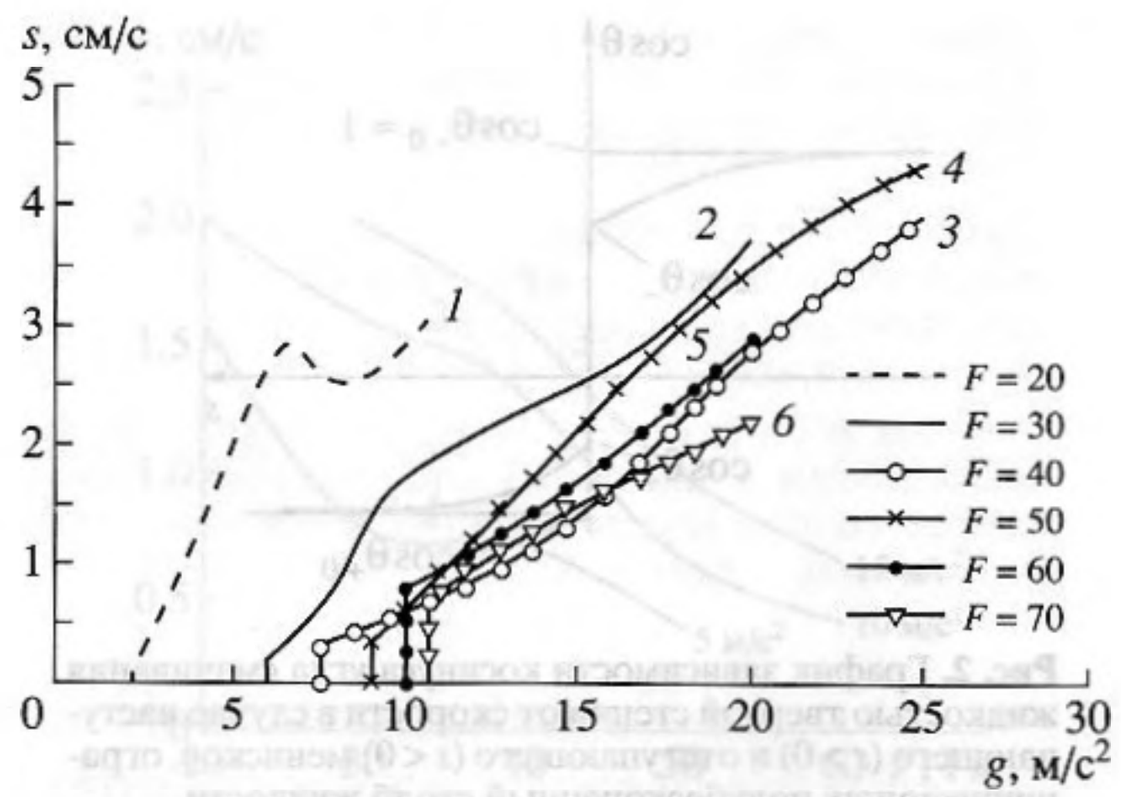

Рис. 1. Кривые *1–6* – зависимость поступательной скорости движения капли (50% раствор вода–глицерин) от амплитуды виброускорения при частотах вибрации, соответственно, 20, 30, 40, 50, 60, 70 Гц.

Нетрудно видеть наличие экспериментального подтверждения некоторых теоретических положений работы [7], в частности, утверждения об увеличении скорости поступательного перемещения с понижением частоты вибрации. Сюда же относится и наблюдаемое в этой серии измерений возрастание порогового значения срыва с повышением частоты вибрации, что согласуется с результатами теоретического рассмотрения, проведенного в указанной работе.

В ней показано, что для оценки порога срыва можно воспользоваться соотношением

$$(y\omega^2)_{\text{пор}} = \frac{2\sigma}{\rho L r}(\cos\theta_- - \cos\theta_+) - g, \qquad (1)$$

где $g = 9.8$ м/с^2 – ускорение свободного падения, разность косинусов контактных углов $\cos\theta_- - \cos\theta_+$ характеризует интервал неопределенности статического угла смачивания мениска, ограничивающего полубесконечный в длину столб жидкости в капилляре (см. рис. 2, на котором качественно

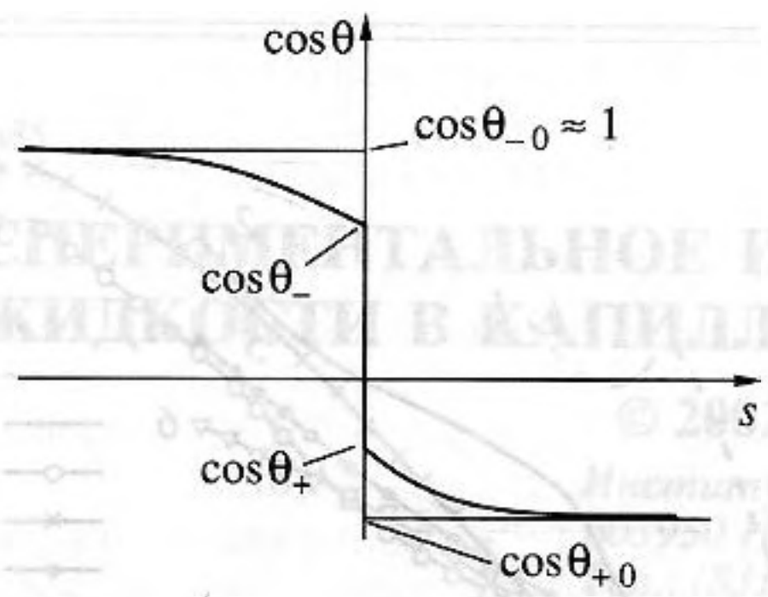

Рис. 2. График зависимости косинуса угла смачивания жидкостью твердой стенки от скорости в случае наступающего ($s > 0$) и отступающего ($s < 0$) менисков, ограничивающих полубесконечный столб жидкости.

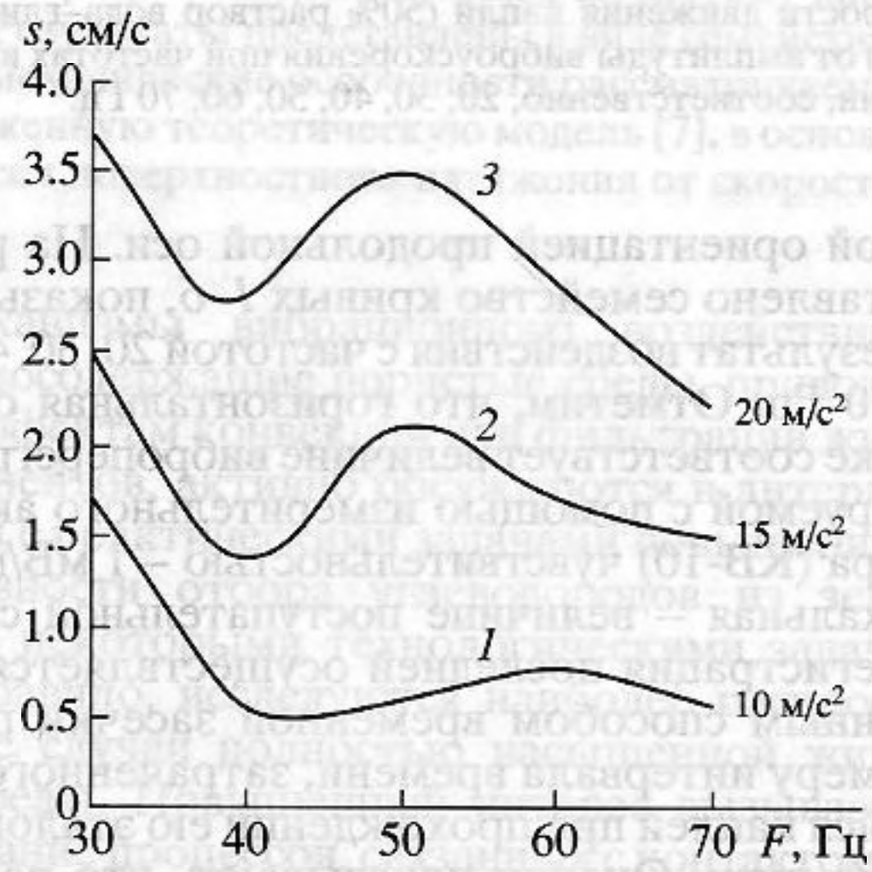

Рис. 3. Кривые *1*, *2*, *3* – зависимость поступательной скорости движения капли (50% раствор вода–глицерин) от частоты вибрации при амплитудах колебательного ускорения, соответственно 10, 15, 20 м/с^2.

изображена зависимость от скорости движения величины косинуса контактного угла мениска, взятая из работы [9]), $\theta_{\mp}$ – предельные статические значения краевого угла при стремлении скорости перемещения мениска к нулю в случаях наступающего и отступающего мениска, σ – константа поверхностного натяжения на границе пары: жидкость – твердая стенка, ρ – плотность жидкости, L – длина капли, r – внутренний радиус капилляра, ω – частота вибрации, y – амплитуда колебательных перемещений стенки.

Изображенный на этом рисунке гистерезис краевого угла неподвижного (статическое положение) мениска обусловливает нелинейный характер движения капельки малых размеров, когда ее длина не более, чем на порядок больше диаметра капилляра. Подстановка конкретных значений параметров, входящих в формулу (1), взятых по справочным данным, а также полученных в эксперименте (на основе представленных кривых), позволяет оценить упомянутый выше интервал неопределенности значений косинуса контактного угла, составляющий примерно 0.3–0.5. Напомним, что эти величины получаются путем аппроксимации кривых *1–6* на рис. 1 к нулевому значению скорости. Близкие к указанным значения получены и в предшествующих работах [9, 10], однако их методика основана на оптическом наблюдении формы мениска, которую несравненно сложнее технически реализовать.

Характерной чертой, отличающей экспериментальные данные проведенной серии измерений, является снижение крутизны амплитудных зависимостей с ростом частоты, которое нетрудно обнаружить из рассмотрения кривых, представленных на рис. 1. Данный экспериментальный факт пока не имеет строгого теоретического объяснения, хотя общие физические соображения указывают на возможное влияние сил стоксова трения на всей боковой поверхности капли, "соприкасающейся" со стенкой, а не только действующих в области менисков, как это имеет место в предложенной упрощенной модели, поэтому роль "пристеночной вязкости" в последующих более совершенных моделях должна быть скорректирована.

На графиках рис. 3 представлены зависимости поступательной скорости как функции частоты при постоянном уровне виброперегрузки, причем семейству из трех кривых *1*, *2*, *3* соответствуют значения амплитуды 10, 15 и 20 м/с^2. Здесь обращает на себя внимание падение скорости движения в среднем с нарастанием частоты при наличии локальных минимума и максимума на всех трех кривых, попадающих в интервал частот 40–60 Гц.

Вторая серия экспериментов выполнена с капелькой воды в таком же капилляре, но уже при его горизонтальной ориентации и параллельной ей поляризации колебаний, обеспечиваемых за счет разворота вибростенда в направлении, перпендикулярном первоначальному положению. Статическое воздействие в этом случае обеспечивается перепадом давления воздуха по одну из сторон капельки, причем перепад давления в компрессионном баллончике относительно атмосферного выбран ~15–16 мм водного столба, что чуть меньше порогового, при котором начинается срыв с последующим равномерным движением центра масс капли длиной 15–20 мм. Подача вибрации некоторого уровня приводит к срыву с положения равновесия, которое при отсутствии вибрации не нагружается. На графиках рис. 4 семейством кривых *1–4* представлены зависимости скорости поступательного движения как функции амплитуды колебательного ускорения, снятые на частотах 30, 40, 50 и 60 Гц. Как и в преды-

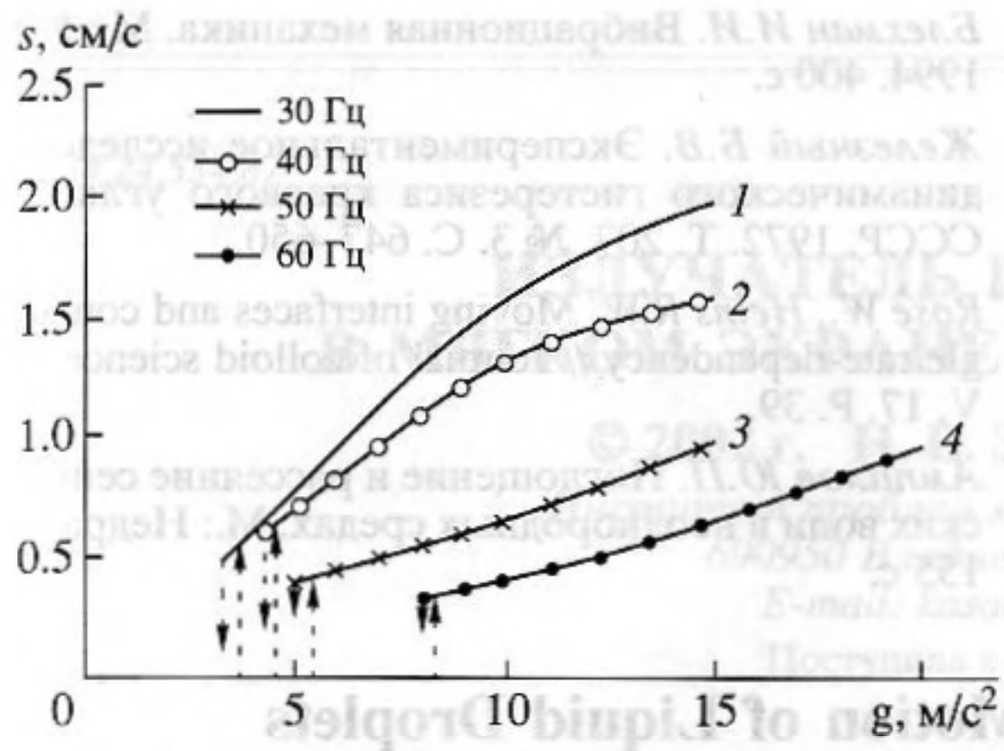

Рис. 4. Кривые *1–4* – зависимость поступательной скорости движения капли (дистиллированная вода) от амплитуды виброускорения при частотах вибрации, соответственно, 30, 40, 50, 60 Гц.

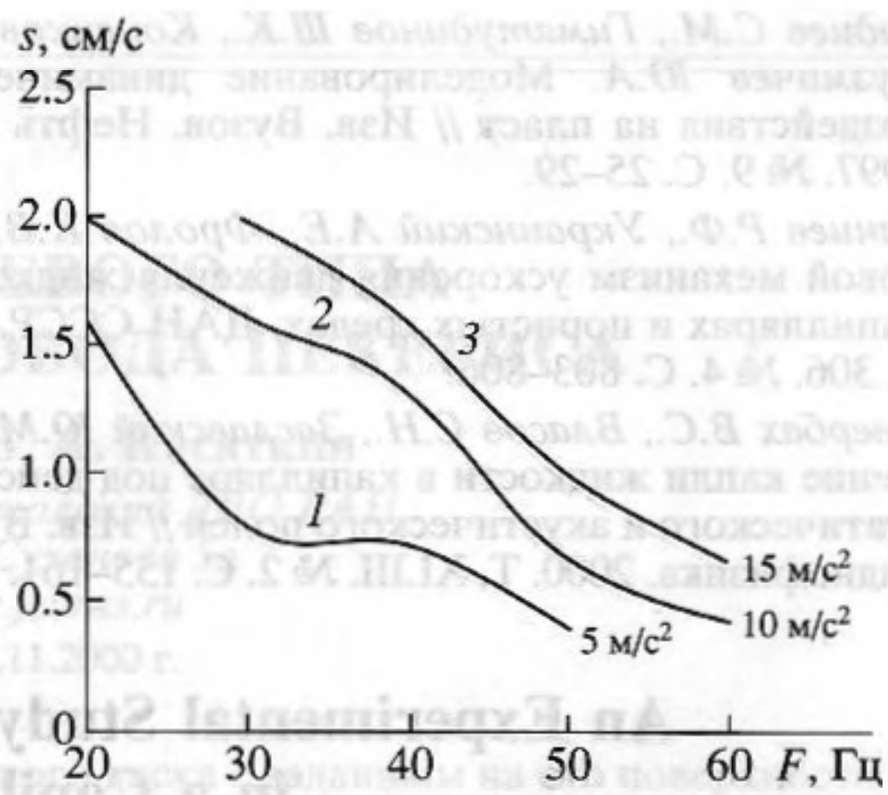

Рис. 5. Кривые *1, 2, 3* – зависимость поступательной скорости движения капли (дистиллированная вода) от частоты вибрации при амплитудах колебательного ускорения, соответственно, 5, 10, 15 м/с^2.

дущей серии измерений, более низким частотам соответствуют большие скорости "течения" капли. Вместе с тем, для кривых этой серии типична несколько меньшая их крутизна или средний наклон, чем в экспериментах с каплей 50% раствора глицерина. Однако существенным отличием от предыдущей серии измерений здесь следует считать не количественную разницу в скоростях движения или в крутизне соответствующих зависимостей, а обнаруженное во второй серии изменений различие в уровнях срыва капли из состояния покоя с переходом к движению при возрастании перегрузки и наоборот, к прекращению поступательного движения в процессе снижения уровня вибрации. Указанное различие невелико, но экспериментально зафиксировано, причем пороговое значение от покоя к движению выше порога с обратным направлением процесса. Это отражено на графиках рис. 4 раздвоением левых частей кривых этого семейства с указанием направления изменения амплитуды виброускорения стрелками.

На графиках рис. 5 семейство кривых *1, 2, 3* показывает зависимость от частоты вибрации величины поступательной скорости движения центра масс капли воды при совместном с пневматическим воздействии, когда их "суммарный" уровень превосходит критическое значение. Здесь проявляется та же тенденция общего спада скорости с ростом частоты, а также присутствие локальных минимума и максимума на ранее указанных частотах.

В целом, экспериментальные данные о характере зависимости поступательной скорости жидких капелек в капиллярной трубке от амплитуды и частоты вибрации, выполненные в присутствии статического силового воздействия разной природы и с различными видами жидкости, обнаруживают в системе капля–капилляр неньютоновый (бингамовский) [11] тип "реологии". Он вызван тем, что наряду с присутствием различных по физической сущности сил, преобладающим оказывается влияние действующего на мениски капли поверхностного натяжения, а также наличием в характеристике сила воздействия – скорость движения специфического гистерезиса, присущего природе этих сил.

В практическом плане настоящие экспериментальные результаты, вероятно, могут представлять интерес для анализа процессов искусственной сушки частично флюидонасыщенных материалов, а также при выработке методов интенсификации, или стимуляции нефтеотдачи скважин путем вибросейсмического воздействия.

В заключение автор благодарит Бирина С.В. за помощь при проведении эксперимента.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 97-02-17537).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шарифулин Р.Я., Туфанов И.А.* Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия. М.: Недра, 2000. 382 с.
2. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика с приложениями к проблемам газовых и нефтяных пластов. М.: Недра, 1996. 447 с.
3. *Roberts P.M., Sharma A.* Low-frequency Acoustic Stimulation of Fluid Flow in Porous Media // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105. № 2. Pt. 2. P. 1385.
4. *Sharma A., Roberts P.M.* Laboratory Observations of Fluid Flow Stimulation in Porous Rocks During Dynamic Stress Excitation // EOS Trans AGU. 1998. V. 79. № 45. P. F895–F896.

5. *Гадиев С.М., Гиматудинов Ш.К., Коненков К.С., Кузмичев Ю.А.* Моделирование динамического воздействия на пласт // Изв. Вузов. Нефть и газ. 1997. № 9. С. 25–29.
6. *Ганиев Р.Ф., Украинский А.Е., Фролов К.В.* Волновой механизм ускорения движения жидкости в капиллярах и пористых средах. ДАН СССР. 1989. Т. 306. № 4. С. 803–806.
7. *Авербах В.С., Власов С.Н., Заславский Ю.М.* Движение капли жидкости в капилляре под действием статического и акустического полей // Изв. ВУЗ'ов Радиофизика. 2000. Т. XLIII. № 2. С. 155–161.
8. *Блехман И.И.* Вибрационная механика. М.: Наука, 1994. 400 с.
9. *Железный Б.В.* Экспериментальное исследование динамического гистерезиса краевого угла. ДАН СССР. 1972. Т. 207. № 3. С. 647–650.
10. *Rose W., Heins R.W.* Moving interfaces and contact angle rate-dependency // Journal of colloid science. 1962. V. 17. P. 39.
11. *Ампилов Ю.П.* Поглощение и рассеяние сейсмических волн в неоднородных средах. М.: Недра, 1992. 155 с.

An Experimental Study of the Motion of Liquid Droplets in a Capillary under Vibration

Yu. M. Zaslavskii

Abstract—Results of an experimental study of the motion of small droplets in a capillary are discussed. The translational velocity of small droplets is studied as a function of the level and frequency of vibration acting together with a static force on the droplet–capillary system. The results are presented in the form of a set of curves, which reveal the nonlinear mechanical features of the system under consideration. The experiments confirm the previously developed theoretical model [7] based on the hysteresis dependence of the surface tension forces on the velocity of the meniscus motion.