

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ КАВИТИРУЮЩИХ СРЕД

С. В. Стебновский

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, 630090 Новосибирск

Экспериментально установлен класс сред, структура которых в процессе импульсного объемного растяжения эволюционирует вследствие неограниченного роста кавитационных пузырьков до пенообразного состояния. К таким средам относятся маловязкие ньютоновские жидкости, а также жидкообразные дисперсные среды (эмульсии, суспензии, гели), имеющие маловязкую жидкую матрицу. Полученные результаты важны для построения обобщенной реологической модели кавитирующих сред.

Для построения обобщенной модели процесса разрушения жидкостных сред, справедливой в диапазоне от маловязких идеально текучих до вязкоупругих неньютоновских жидкостей, необходимо располагать экспериментальной информацией об эволюции их структуры в процессе импульсного растяжения. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования структуры растягиваемых в волне разгрузки жидкостных сред с различными реологическими свойствами.

1. Эксперименты проводились на стенде, схема которого приведена на рис. 1. Здесь А — газовая пушка, предназначенная для импульсного нагружения поршнем-ударником мишени (образца исследуемой жидкостной среды); Б — импульсная подсветка с конденсорами; В — фотокамера (12 × 18 см); Г — измерительная аппаратура. В исходном состоянии ресивер 1 заполнен сжатым воздухом до заданного давления $P_* = 3 \cdot 10^5 \div 12 \cdot 10^5$ Па. Клапан тиратронного типа 2 закрыт, а электромагнитный клапан 3 открыт. Поршень-ударник (жесткий пенопластовый цилиндр с наклеенной «ударной» пластинкой из оргстекла) 4 расположен в нижней части вакуумированной разгонной секции 5 над клапаном 3. На легко разрушаемой тонкой мембране 6 в камере квадратного сечения (1,6 × 1,6 см) 7, снабженной щелевыми окнами 8, находится исследуемый жидкостный образец 9. Камера оснащена демпфирующим устройством 10 для гашения кинетической энергии разрушающегося образца 9. После срабатывания клапана 2 сжатый воздух разгоняет поршень, при полете которого к оптическим датчикам 12 измерительная аппаратура регистрирует его скорость. При этом клапан 3 закрывается, отсекая поступление воздуха из ресивера в разгонную секцию. Непосредственно после регистрации скорости поршня датчиками происходит его удар по образцу. В результате по исследуемой среде распространяется регистрируемая датчиком давления 11 ударная волна треугольного профиля (показан справа на рис. 1).

После выхода фронта волны на свободную поверхность образца на стадии разгрузки начинается процесс его осевого растяжения. По зарегистрированной скорости ударника с учетом ударных адиабат материалов ударника и образца методом P , U -диаграмм определяется давление во фронте ударной волны, генерируемой в образце. Так, в случае ударника из оргстекла при $P_* = 3 \cdot 10^5 \div 12 \cdot 10^5$ Па его скорость в момент удара варьируется в диапазоне $68 \div 200$ м/с, а давление во фронте волны, например, в водяном образце — в диапазоне $6 \cdot 10^7 \div 22 \cdot 10^7$ Па.

2. В работе в качестве образцов использовался набор следующих сред:

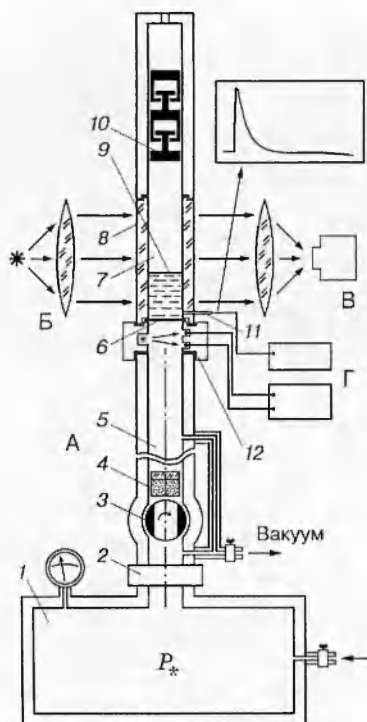


Рис. 1

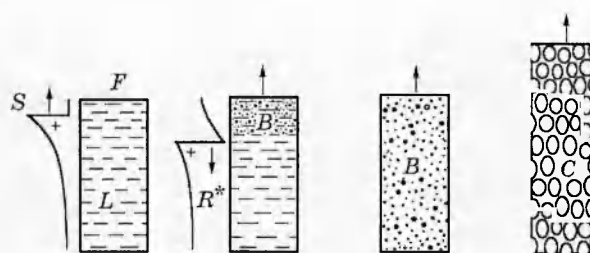


Рис. 2

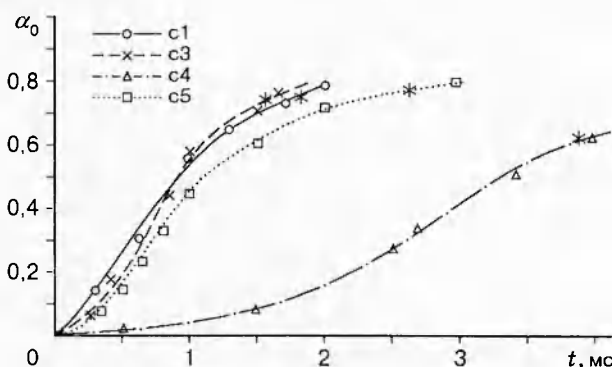


Рис. 3

- с1 — вода: ньютоновская маловязкая жидкость (сдвиговая вязкость $\mu = 1,003 \cdot 10^{-3}$ Па·с);
 с2 — глицерин: ньютоновская вязкая жидкость ($\mu = 1,450$ Па·с);
 с3 — эмульсия (капли вазелинового масла диаметром $2 \cdot 10^{-4} \div 8 \cdot 10^{-4}$ см в воде с объемной концентрацией $\alpha_1 \approx 0,77$): неньютоновская псевдопластическая жидкость, имеющая нулевой уровень предельного напряжения сдвига ($\tau^* = 0$) и эффективную вязкость сдвига μ_* , убывающую с ростом скорости сдвигового напряжения $\dot{\epsilon}$;
 с4 — лиофильная суспензия (частицы песка $30 \cdot 10^{-4} \div 100 \cdot 10^{-4}$ см, $\alpha_1 = 0,7$ в воде): неньютоновская дилатантная жидкость, имеющая $\tau^* = 0$ и μ_* , возрастающее с ростом $\dot{\epsilon}$;
 с5 — гель (вода, поливинилпирролидон, пропиленгликоль, динатриевая соль этиленди-тетрауксусной кислоты): твердообразное тело Бингама ($\tau^* > 0$), состоящее из жидкой матрицы и ультрадисперсных твердых частиц, образующих структурированные системы, т. е. неньютоновская тиксотропная жидкость, способная восстанавливать структуру после ее механического разрушения, когда при $\tau > \tau^*$ она переходит в состояние золя.

Таким образом, используемые образцы позволяют произвести сравнительный анализ особенностей поведения конденсированных сред при импульсном объемном растяжении в диапазоне реологических параметров от текучей маловязкой жидкости до твердообразного тела Бингама. Во всех опытах использовались образцы размером $1,6 \times 1,6 \times 2,8$ см. На свободной поверхности образца для предотвращения формирования (в процессе его растяжения) струйного течения помещался пенопластовый поплавок. Скорость ударника и его параметры выбирались такими, чтобы во всех средах формировались ударные волны с давлением во фронте порядка 10^8 Па и протяженностью, равной длине образца.

3. В результате проведенных экспериментов установлено следующее. Во всех жидкостных средах после выхода ударной волны S (рис. 2) на свободную поверхность F за фронтом распространяющейся по образцу L волны разрежения R^* начинают развиваться кавитационные пузырьки (зона B). На рис. 3 приведены графики, характеризующие рост средней по объему образца концентрации кавитационных пузырьков α_0 в процессе его растяжения.

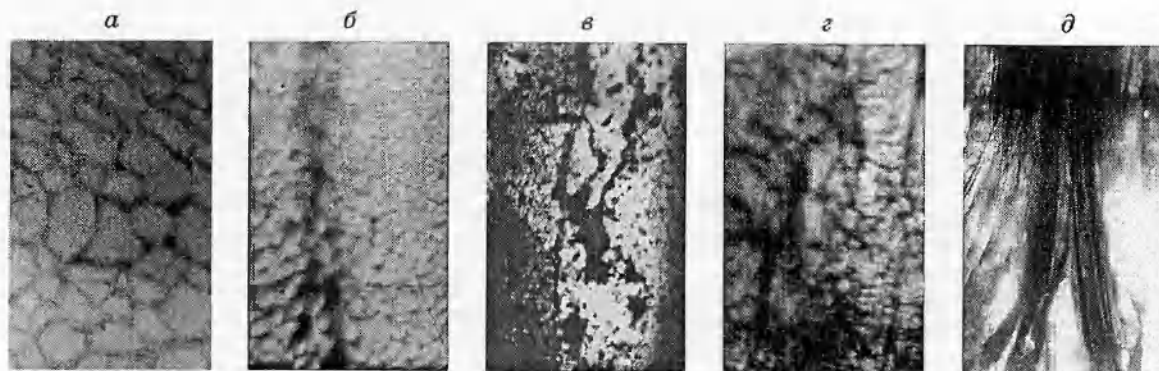


Рис. 4

Значения $\alpha_0(t)$ определялись по приращению объема растягиваемого образца. Из графиков следует, что динамика роста α_0 практически не зависит от реологических характеристик растягиваемых жидкостных сред, но зависит от их плотности. Действительно, примерно равные по плотности, но совершенно разные по реологическим параметрам среды: с1 (маловязкая вода), с3 (высококонтрированная эмульсия) и с5 (твердообразный гель после разрушения его структурной вязкости в волне разрежения) — имеют почти одинаковые скорости роста кавитационных пузырьков. В среде с4 (высококонтрированной суспензии вода — песок), более чем в 2 раза превышающей по плотности среды с1, с3 и с5, скорость роста α_0 существенно ниже.

На графиках звездочками отмечены точки, соответствующие стадии формирования ячеистых структур в растягиваемых образцах (рис. 2, зона С). Типичные фоторегистрограммы ячеистых структур в средах с1, с3, с4 и с5 приведены соответственно на рис. 4, а–г. Следует отметить, что характер роста α_0 во всех случаях одинаков (рис. 3), но структура кавитирующих сред имеет некоторое различие, причина которого заключается в следующем. В среде с1 пенные ячейки формируются в гомогенной маловязкой жидкой матрице, и поэтому в процессе роста пузырьков происходит их интенсивное слияние, а, следовательно, и укрупнение с последующим образованием крупноячеистой пенной среды. В с3 пузырьки растут в псевдопластической эмульсионной матрице, что несколько затрудняет процесс их слияния. Результат — характерный масштаб ячеек несколько меньше, нежели в первом случае, но выше их счетная концентрация (при равных значениях α_0). В среде с5 в исходном состоянии тиксотропная матрица содержит микропоры, а затем в процессе объемного растяжения снижается ее структурная вязкость и поры начинают расти за счет перепада давления. В этом случае низкая скорость слияния пор обусловлена остаточной структурной вязкостью геля, переходящего в окрестностях пор в состояние золя. Результат — снижение характерных размеров ячеек. В среде с4 этот эффект еще больше усиливается вследствие высокой плотности твердодисперсной суспензионной матрицы. Кроме того, в этом случае присутствие крупнодисперсных тяжелых лиофильных частиц снижает устойчивость пенной структуры и фрагментация среды начинается раньше, нежели в первых трех случаях (следы фрагментации видны в левой части рис. 4, в).

Таким образом, хотя в процессе объемного растяжения рассматриваемых сред изменение их структуры имеет некоторое различие, обусловленное особенностями морфологии частиц, в целом процесс развивается в рамках единой физической модели, проходя стадии зарождения и неограниченного роста кавитационных пузырьков или пор (в случае с4), формирования ячеистых структур, разрушения среды на отдельные фрагменты.

Что же касается среды с2, то она ведет себя совершенно иначе. За фронтом волны разгрузки в среде не наблюдается отчетливое развитие кавитационного процесса, а происхо-

дит формирование темных полос, напоминающих «волоконистую» структуру. На рис. 4, д приведена фотография такой структуры на стадии растяжения глицеринового образца, соответствующей формированию ячеек в средах с1, с3, с4 и с5 (рис. 4, а-г). Очевидно, что в среде с2 ячейки не образуются вследствие того, что в ней не происходит неограниченное развитие кавитации. Причиной этого, по-видимому, является слишком большая диссипация энергии, обусловленная вязкостью среды на самой начальной стадии развития кавитационных пузырьков, что «замораживает» их дальнейший рост.

Действительно, из уравнения динамики пузырька для вязкой несжимаемой жидкости [1], записанного с учетом поверхностного натяжения σ

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + (2\mu\dot{R} + \sigma)\frac{2}{\rho R} = \frac{P_1 - P_2}{\rho}$$

(R — радиус пузырька; μ , ρ — коэффициент сдвиговой вязкости и плотность жидкости; P_1 , P_2 — давление в пузырьке и в жидкости), следует уравнение баланса энергии

$$\frac{\rho}{2} R^3 \dot{R}^2 = \frac{R^3 - R_0^3}{5} (P_1 - P_2) - (R^2 - R_0^2)\sigma - 4\mu \int_0^t R\dot{R}^2 dt$$

в момент времени t , соответствующий радиусу расширяющегося пузырька R . Здесь первый член справа — удельная работа по расширению пузырька от R_0 до R в поле противодействия P_2 ; второй член — приращение удельной свободной энергии системы вследствие увеличения поверхности пузырька от $4\pi R_0^2$ до $4\pi R^2$; третий член — диссипация энергии, обусловленная вязкостью жидкости (на один стерадиан). Следовательно, в случае роста кавитационного пузырька в глицерине диссипативные потери энергии (при прочих равных условиях) на три порядка выше, нежели в случае воды, что существенно снижает долю энергии, расходуемой на расширение пузырька.

Определение механизма формирования «волоконистой» структуры в процессе растяжения среды с2 требует проведения специального исследования.

Таким образом, реологической моделью развития кавитационного процесса и формирования ячеистых структур в растягиваемых жидкостных средах, ранее предложенной в работах [2, 3], можно аппроксимировать объемное растяжение всех маловязких гомогенных жидкостей, а также неньютоновских жидкообразных сред с маловязкой жидкой матрицей. Вопрос о моделировании структуры растягиваемых жидких сред, обладающих очень большой вязкостью, может быть рассмотрен после дополнительных экспериментальных исследований особенностей развития в них пузырьковой кавитации, а также гидродинамической устойчивости их структуры в процессе объемного растяжения. Это относится также и к дисперсным средам, имеющим жидкую матрицу с очень большой вязкостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-01-01772).

ЛИТЕРАТУРА

1. Poritsky H. The collapse or growth of a spherical bubble or cavity in a viscous fluid // Proc. First U. S. Nat. Congress Appl. Mech. (ASME). 1952. P. 813–821.
2. Стебновский С. В. К построению реологической модели кавитирующих дисперсных жидких сред // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 1. С. 129–138.
3. Стебновский С. В. Реологическая модель объемного растяжения ньютоновских жидкостей // ПМТФ. 1998. Т. 39, № 1. С. 35–46.