

УДК 532.528

## О ФРАГМЕНТАЦИИ ЖИДКИХ И ЖИДКОПЛАСТИЧНЫХ СРЕД ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

С. В. Стебновский

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

E-mail: stest@hydro.nsc.ru

На основе качественного анализа результатов проведенных экспериментальных исследований определены основные механизмы разделения на фрагменты полярных жидкостей и жидкопластичных сред при динамическом нагружении. В случае маловязкой жидкости такими механизмами являются термодинамическая неустойчивость пены, гидродинамическая неустойчивость начальных возмущений свободной поверхности и действие капиллярных сил; в случае полярной высоковязкой жидкости — сдвиговая неустойчивость структуры, которая приводит к расслоению среды по линиям локального разрушения структурной вязкости, и действие капиллярных сил; в случае жидкопластичной структурированной среды (геля) — “отколы” в зоне растягивающих напряжений, если время их формирования меньше времени перехода геля в золь, а также термодинамическая неустойчивость пены и действие капиллярных сил после перехода среды в состояние золя.

Ключевые слова: жидкости, структурная вязкость, кавитация, пластическое течение, фрагментация.

Согласно результатам многочисленных исследований вязкое разрушение конденсированных сред обусловлено ростом кавитационных полостей и макромасштабным пластическим деформированием с последующей фрагментацией нагружаемого образца. Наименее изученной является стадия фрагментации высоковязких жидкостей и жидкопластичных сред. Более подробно исследовалось динамическое разрушение маловязких жидкостей (воды, этилового спирта, ацетона и др.). Так, в случае объемного растяжения маловязких жидкостей их разрушение происходит вследствие развития неограниченной пузырьковой кавитации и последующего формирования термодинамически неустойчивой пенной структуры (см. работу [1] и библиографию к ней). Кроме того, маловязкая жидкость может разрушаться вследствие развития из начальных возмущений ее свободной поверхности струйных образований [2], которые затем фрагментируются под действием капиллярных сил. Согласно [3] в маловязких жидкостях при сдвиговом деформировании в режиме стационарного пластического течения (типа течения Куэтта) фрагментации среды не происходит. В то же время в высоковязкой полярной жидкости при сдвиговом деформировании наблюдается неустойчивость структуры, что приводит к формированию в среде зон с локальным разрывом структурной вязкости (РСВ) [3]. Аналогично в твердопластичных средах вследствие сдвигового деформирования образуются линии скольжения [4, 5]. Однако для того чтобы жидкий высоковязкий объем разделился на фрагменты, в нем должны образоваться разрывы сплошности среды. Возникает вопрос: каким образом происходит формирование разрывов сплошности в жидких и жидкопластичных средах на последних стадиях их разрушения?

Исследование стадии фрагментации жидких и жидкопластичных сред проводилось с использованием экспериментальной методики, схема которой показана на рис. 1. Разгон

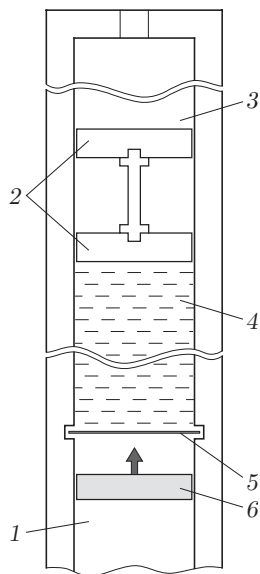


Рис. 1

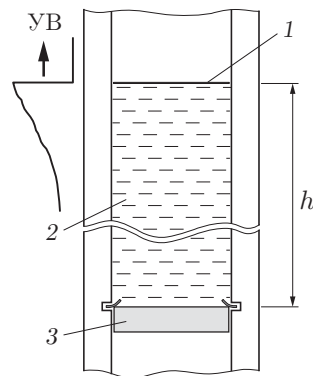


Рис. 2

Рис. 1. Схема импульсного нагружения образца исследуемой среды:

1 — вакуумированный канал газовой пушки; 2 — двоянный пенопластовый поршень; 3 — прямоугольный канал ( $1,8 \times 1,8$  см) с прозрачными окнами; 4 — исследуемый жидкий образец ( $h = 6$  см); 5 — тонкая, легко разрушаемая мембрана; 6 — ударник из оргстекла

Рис. 2. Схема формирования УВ:

1 — свободная поверхность; 2 — жидкий образец; 3 — ударник из оргстекла

ударника осуществляется с помощью газовой пушки, описанной в [6]. Легкий двоянный пенопластовый поршень устраняет мениск на свободной поверхности образца. В результате удара пластины по мембране в некоторый момент времени  $t_0$  в жидком образце формируется ударная волна (УВ) (рис. 2). После выхода фронта УВ на свободную поверхность начинается разгрузка образца — переход энергии волны в кинетическую энергию жидкого образца, перемещающегося вверх по каналу, и в упругую энергию образца вследствие его растяжения вдоль оси симметрии. Однако, поскольку реальная жидкость всегда содержит кавитационные зародыши, упругая энергия образца расходуется на образование в среде кавитационных полостей. При этом характер деформирования перемещающегося в канале образца и развитие в нем кавитационного процесса зависят от реологических свойств исследуемой среды и характера ее нагружения.

Эксперименты по исследованию механизмов разделения среды на фрагменты проводились с образцами воды, глицерина и геля (состав геля: вода, поливинилпирролидон, пропиленгликоль, динатриевая соль этилендигетрауксусной кислоты), нагружаемых УВ с амплитудой  $6 \cdot 10^7 \div 12 \cdot 10^7$  Па (длительность волны составляет  $5 \cdot 10^{-6}$  с). Регистрация процесса разгрузки образца на различных стадиях осуществлялась фотокамерой в режиме открытого затвора с импульсной подсветкой. Ниже представлены результаты проведенных опытов.

**Водяной маловязкий образец.** На начальной стадии разгрузки водяной маловязкий образец перемещается вверх по каналу как жидкий маловязкий поршень, кавитирующий вследствие продольного растяжения (рис. 3). По мере неограниченного роста кавитационных пузырьков водяной поршень переходит в состояние псевдопластичного тела [1]. С увеличением размеров пенных ячеек растет суммарная площадь поверхности их стенок, т. е.

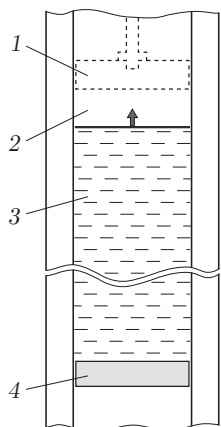


Рис. 3

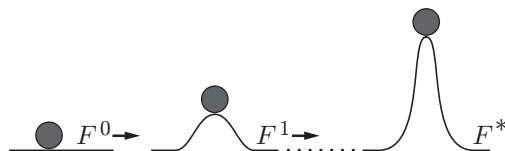


Рис. 4

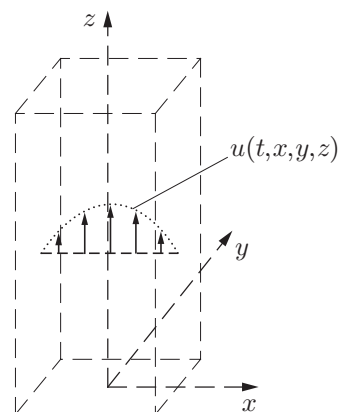


Рис. 5

Рис. 3. Схема нагружения водяного образца:

1 — пенопластовый поршень; 2 — прямоугольный канал; 3 — водяной маловязкий образец; 4 — ударник из оргстекла

Рис. 4. Энергетические уровни нагружаемой системы

Рис. 5. Эпюра скоростей в перемещающемся по каналу образце с пенной структурой

суммарная свободная (поверхностная) энергия системы  $F$ . Согласно известной теореме Лежен — Дирихле, если в некотором положении системы свободная энергия  $F$  имеет минимум, то такое положение является устойчивым, поэтому с увеличением  $F$  система с пенной структурой все больше отклоняется от состояния устойчивого равновесия. На рис. 4 показано семейство энергетических поверхностей системы. Видно, что с увеличением  $F$  состояние системы становится все более неустойчивым. В результате наступает момент, когда незначительная флуктуация какого-либо параметра пенной структуры инициирует ее переход в более устойчивое состояние, сопровождающийся переходом части накопленной в системе свободной энергии в кинетическую энергию процесса перестройки структуры ячеек [7, 8]. Наиболее вероятным “спусковым механизмом” такого процесса является локальное флуктуационное уменьшение поверхностной вязкости перемычки (пленки) между ячейками пены, что приводит к необратимому утончению этой пленки [9] и ее последующему разрыву капиллярными силами. В результате нарушается равновесное состояние соседних ячеек и т. д.

Поскольку пенообразная среда обладает структурной вязкостью, в процессе перемещения по каналу такого образца в нем формируется эпюра скоростей (рис. 5), характерная для сдвигового течения с соответствующим полем сдвиговых напряжений  $\tau$ . Вследствие этого, если в какой-либо зоне течения  $\tau$  превысит предел текучести  $\tau_*$ , то в среде будут формироваться участки взаимного скольжения пенных слоев [8], что также может служить причиной образования разрывов пенной структуры среды. На рис. 6, а приведена фотография разрушающегося водяного образца после его перехода под действием растягивающих напряжений в пенообразное состояние. Четко видны отрыв фрагмента пены, а также описанные выше разрывы пенной структуры, образовавшиеся вследствие разрушения пенных ячеек и взаимного проскальзывания слоев пены.

**Глицериновый высоковязкий образец.** Глицериновый высоковязкий образец после нагружения ударником (см. рис. 1) и выхода УВ на свободную поверхность перемещается по каналу при отсутствии в жидкой среде видимой пузырьковой кавитации, что согласо-

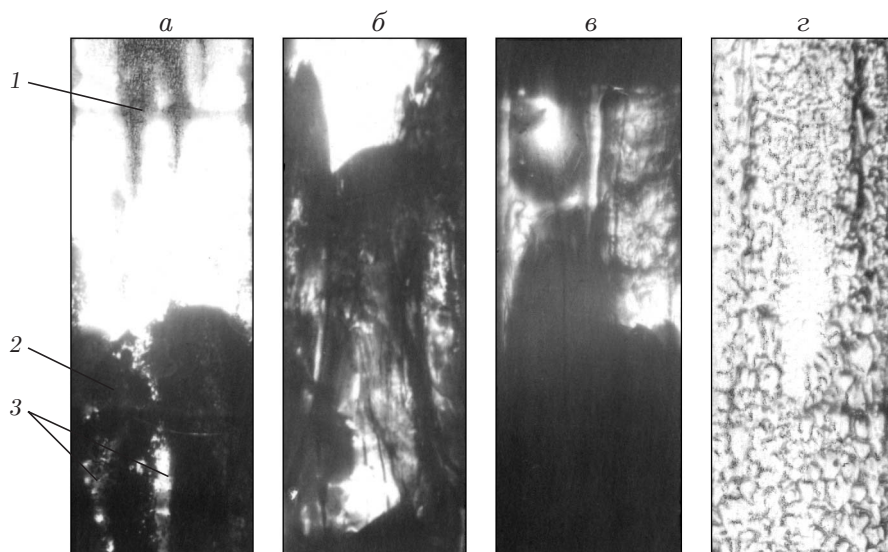


Рис. 6. Разрушение структуры разгружаемых образцов:  
*a* — вода; *б* — глицерин; *в* — гель через  $10^{-3}$  с после начала разгрузки; *г* — гель через  $6 \cdot 10^{-3}$  с после начала разгрузки; 1 — отделяющийся фрагмент пенной структуры; 2 — пенообразное состояние водяного образца; 3 — разрыв пенной структуры

ется с полученными ранее результатами исследования особенностей развития кавитации при ударно-волновом нагружении глицерина [1]. На рис. 6,б приведена фотография перемещающегося вверх по каналу глицеринового образца на стадии его расслоения на отдельные волокнистые фрагменты (через  $1,5 \cdot 10^{-3}$  с после начала нагружения). Рассмотрим механизм такой фрагментации. В процессе перемещения по каналу высоковязкого глицеринового образца в среде формируется пуазелейевский профиль скоростей (см. рис. 5), т. е. течение имеет сдвиговый характер. Кроме того, поскольку течение сформировалось вследствие ударно-волнового нагружения, в среде должен присутствовать градиент скорости, направление которого совпадает с направлением движения свободной границы образца. Однако, как отмечено выше, импульсное растяжение глицерина за фронтом УВ не успевает сформировать в среде пузырьковую кавитацию.

Согласно [3] в процессе сдвигового течения в глицерине всегда формируются зоны с РСВ — узкие зоны (ориентированные в направлении течения жидкости), в которых структурная вязкость практически на порядок меньше исходного значения. Поскольку скорость течения уменьшается в направлении стенок канала, происходит расслоение потока. При интенсивном сдвиговом нагружении твердопластичных материалов в областях, в которых образовались линии скольжения, структурная вязкость также уменьшается вследствие перехода вещества в атом-вакансионное состояние [4], что способствует макромасштабному сдвиговому деформированию.

Как известно, в высоковязких жидкостях кавитационные пузырьки могут расти до размеров, существенно превышающих видимые (0,01 см) [10], при условии, что время существования поля растягивающих напряжений значительно больше времени действия волны разгрузки  $\Delta t^*$ . Следовательно, поскольку время перемещения глицеринового образца  $\Delta \tilde{t} \gg \Delta t^*$ , в зонах тангенциальных разрывов при определенных значениях скорости сдвиговой деформации возможно появление растягивающих напряжений [11]. С учетом этого для выявления возможности развития кавитации в глицерине за время  $\Delta \tilde{t}$  проводились тестовые эксперименты по схемам, представленным на рис. 7,а,б. Жидкий образец, пластины и направляющие с обеих сторон ограничены прозрачными плоскопараллель-

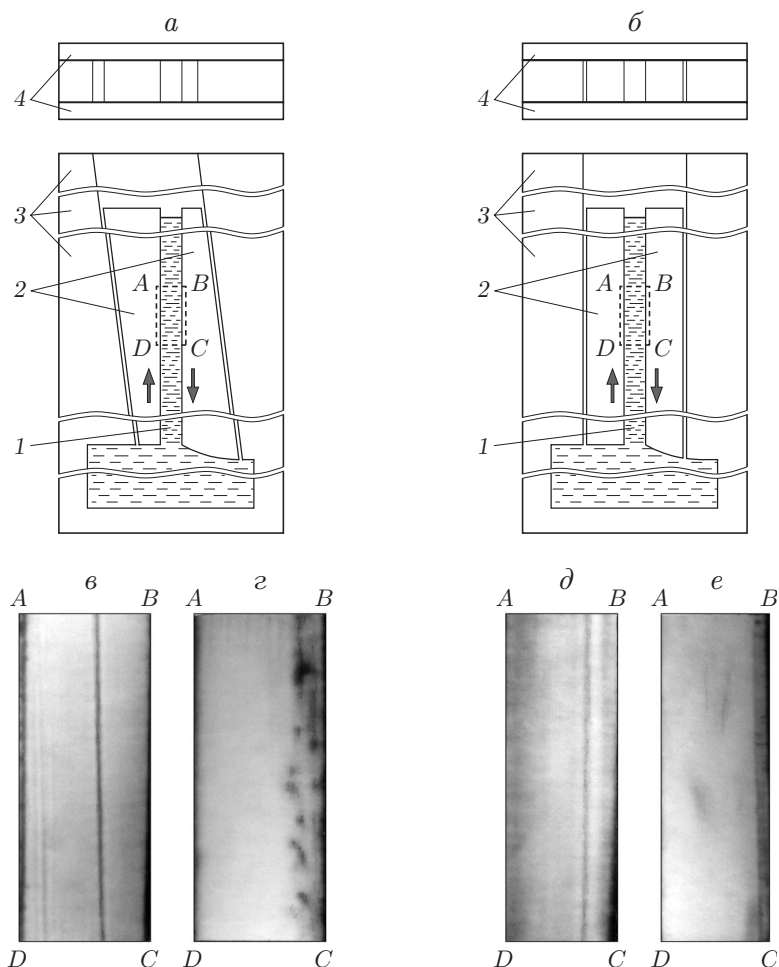


Рис. 7. Сдвиговые течения жидкостей в плоских каналах:

*a* — схема формирования встречных потоков с поперечным растяжением; *б* — схема формирования встречных плоскопараллельных потоков (*1* — жидкий образец; *2* — две перемещающиеся в противоположных направлениях пластины; *3* — направляющие, по которым скользят пластины; *4* — прозрачные плоскопараллельные стенки); *в*, *г* — сдвиговое течение с поперечным растяжением (*в* — глицириновый образец; *г* — водяной образец); *д*, *е* — плоскопараллельное сдвиговое течение (*д* — глицириновый образец; *е* — водяной образец)

ными стенками. Пластины скользили по направляющим со скоростью  $20 \div 100$  см/с (в зависимости от вязкости жидкости).

После срабатывания пружинных устройств начинается встречное перемещение пластин, вследствие чего в образце формируются встречные потоки жидкости, “увлекаемые” пластинами. В [11] установлено, что в области встречных потоков глицирина образуется зона с РСВ. Однако в случае течения в соответствии со схемой, приведенной на рис. 7, *a*, при вертикальном встречном перемещении пластин одновременно происходит их удаление друг от друга в горизонтальном направлении и начальная ширина заполненного жидкостью канала, равная 0,4 см, увеличивается до 0,7 см. Вследствие этого в зоне с РСВ искусственно поддерживается растягивающее напряжение в течение  $0,1 \div 0,2$  с. При встречном перемещении пластин в соответствии со схемой, приведенной на рис. 7, *б*, расстояние между ними остается равным 0,4 см и в глицириновом образце формируется зона с РСВ без воздействия на него растягивающих напряжений. Помимо экспериментов, в которых исследовалась возможность развития пузырьковой кавитации в зоне с РСВ под действием

растягивающих напряжений в глицериновых образцах, проводились аналогичные опыты с водяными образцами. Процессы регистрировались с помощью видеокамеры, видеомагнитофона и компьютера.

В результате проведенной серии экспериментов установлено следующее. В случае глицеринового образца воздействие растягивающих напряжений на зону с РСВ не вызывает видимой пузырьковой кавитации. Иными словами, даже если пузырьки растут, они не успевают достичь видимых размеров (приблизительно равных 0,01 см), и зоны с РСВ на рис. 7,в практически не отличаются от зон с РСВ на рис. 7,д, образованных в отсутствие растягивающих напряжений (см. рис. 7,б). Для сравнения на рис. 7,г приведена фотография участка водяного образца, в котором формируются встречные потоки при воздействии растягивающих напряжений (см. рис. 7,а), а на рис. 7,е во встречных потоках воды поле растягивающих напряжений отсутствует (см. рис. 7,б). Как и следовало ожидать, в водяных образцах зоны с РСВ не образуются [3], но в поле растягивающих напряжений в маловязкой воде, в отличие от высоковязкого глицерина, успевает развиваться интенсивная пузырьковая кавитация (см. рис. 7,з).

Из результатов проведенных экспериментов следует, что в зонах с РСВ в глицериновом образце видимый кавитационный процесс не наблюдается даже в результате воздействия на них растягивающих напряжений в течение  $0,1 \div 0,2$  с. Можно полагать, что в процессе волокнистой фрагментации глицерина, наблюдаемой через  $1,5 \cdot 10^{-3}$  с после начала нагружения (см. рис. 6,б), определяющую роль играют расслоение потока по вязкости (на зоны с РСВ) и перемещение с различной скоростью вдоль оси канала образующихся слоев жидкости.

**Гелевый образец.** На начальной стадии процесса импульсного нагружения ударником (см. рис. 1) поведение гелевого образца аналогично поведению упругопластичновязкого тела. Под действием поля растягивающих напряжений за фронтом отраженной от свободной поверхности образца волны разрежения в нем образуются разрывы (“отколы”). На рис. 6,в представлена фотография процесса через  $10^{-3}$  с после начала разгрузки, на которой видно, что разделение гелевого образца на фрагменты на начальной стадии аналогично процессу разрушения твердопластичного материала [4, 5]. Однако в дальнейшем под действием сдвиговых напряжений происходит реструктуризация геля (резкое уменьшение его структурной вязкости до уровня ньютоновской) и переход его в состояние золь (текучей жидкости, содержащей высокодисперсные частицы — мицеллы), в котором развивается кавитационный процесс. В конечном счете среда приобретает свойства пенной структуры (см. рис. 6,г). (Фотография сделана через  $6 \cdot 10^{-3}$  с после начала разрушения образца.)

Анализ процесса фрагментации на различных стадиях показывает, что если характерное время формирования волны разрежения в геле меньше периода его реструктуризации (времени фазового перехода упругопластичного геля в жидкое текучее состояние — золь), то первая стадия фрагментации проходит в режиме разрушения твердопластичного материала. В дальнейшем золь кавитирует в поле растягивающих напряжений (обусловленных градиентом массовой скорости в золе), переходит в состояние пены, после чего пенная структура разрушается под действием капиллярных сил, как и в случае водяного образца.

Таким образом, из проведенных экспериментов следует, что фрагментация полярных жидкостей и жидкопластичных сред определяется следующими механизмами. В случае маловязкой жидкости, трансформирующейся вследствие развития неограниченной кавитации в пенную структуру, а также из-за развития возмущений свободной поверхности фрагментация обусловлена действием капиллярных сил. В случае высоковязкой полярной жидкости фрагментация происходит вследствие расслоения среды по линиям разрыва

структурной вязкости, обусловленным структурной неустойчивостью жидкости при сдвиговом деформировании. В случае упругопластичного геля на начальной стадии разгрузки фрагментация обусловлена образованием “отколов”, а затем (после разрушения структуры среды и перехода ее в пенообразное состояние) происходит под действием капиллярных сил.

Полученные в данной работе результаты необходимы для построения обобщенной физической модели вязкого разрушения жидких и жидкопластичных сред.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Стебновский С. В.** Условия формирования пузырьковых суспензий при ударно-волновом нагружении жидкостей // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 2. С. 53–63.
2. **Стебновский С. В.** Устойчивость структуры жидких поршней при их нестационарном ускорении // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2003. № 6. С. 8–15.
3. **Стебновский С. В.** Сдвиговая неустойчивость структуры сред, обладающих вязкой текучестью // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 2. С. 70–76.
4. **Панин В. Е.** Структурные уровни деформации твердых тел / В. В. Панин, В. А. Лихачев, Ю. В. Гриняев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1985.
5. **Рыбин В. В.** Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986.
6. **Стебновский С. В.** Экспериментальное исследование импульсного растяжения кавитирующих сред // ПМТФ. 1998. Т. 39, № 5. С. 122–125.
7. **Kraupnik A. M., Hansen M. L.** Foam rheology: a model of viscous phenomena // J. Rheol. 1987. V. 31, N 2. P. 175–203.
8. **Стебновский С. В.** К построению реологической модели кавитирующих дисперсных жидких сред // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 1. С. 129–138.
9. **Marrucci G.** A theory of coalescence // Chem. Engng Sci. 1969. V. 24. P. 975–985.
10. **Се Дин-ю.** Рост пузырька в вязкой жидкости, вызванный кратковременным импульсом // Тр. Амер. о-ва инженеров-механиков. Сер. D. Теорет. основы инж. расчетов. 1973. № 1. С. 170–174.
11. **Стебновский С. В.** Тангенциальные разрывы параметров полярной жидкости при сдвиговом деформировании // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 3. С. 41–49.

*Поступила в редакцию 28/VI 2006 г.*

---