

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

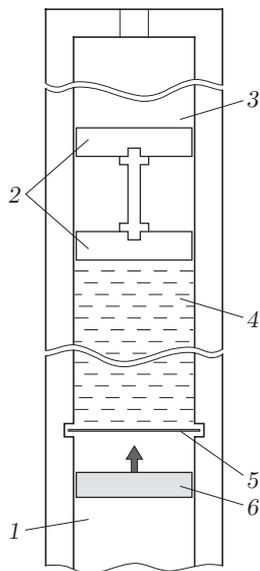


Рис. 1

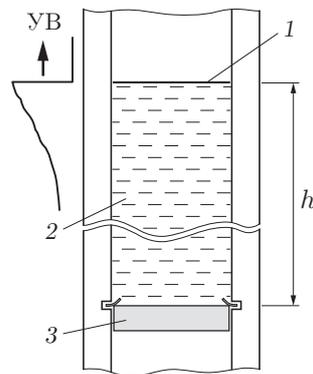


Рис. 2

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.

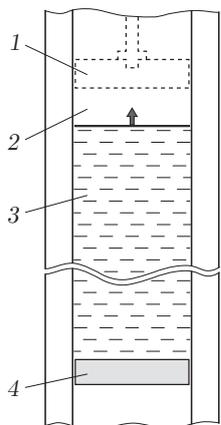


Рис. 3

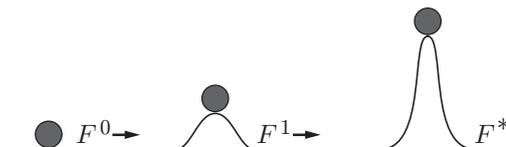


Рис. 4

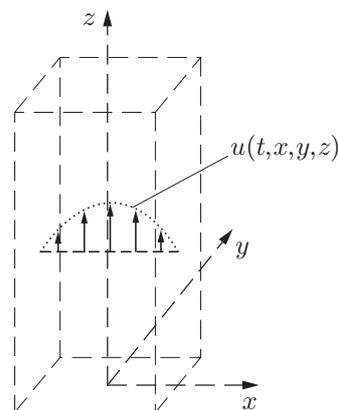


Рис. 5

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 τ . Вследствие этого, если в какой-либо зоне течения τ превысит предел текучести τ_* , 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-

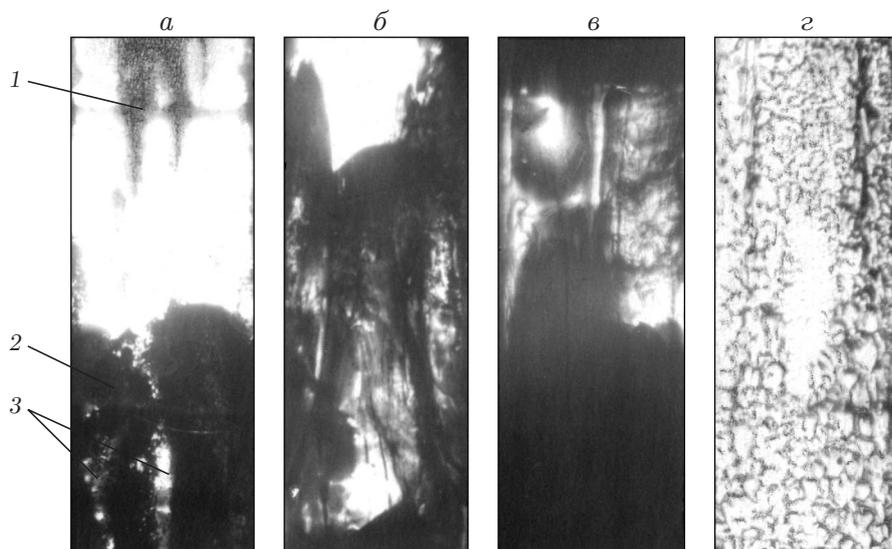


Рис. 6. Разрушение структуры разгружаемых образцов:
a — вода; *б* — глицерин; *в* — гель через 10^{-3} с после начала разгрузки; *г* — гель через $6 \cdot 10^{-3}$ с после начала разгрузки; 1 — отделяющийся фрагмент пенной структуры; 2 — пенообразное состояние водяного образца; 3 — разрыв пенной структуры

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 Δt^* . 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-

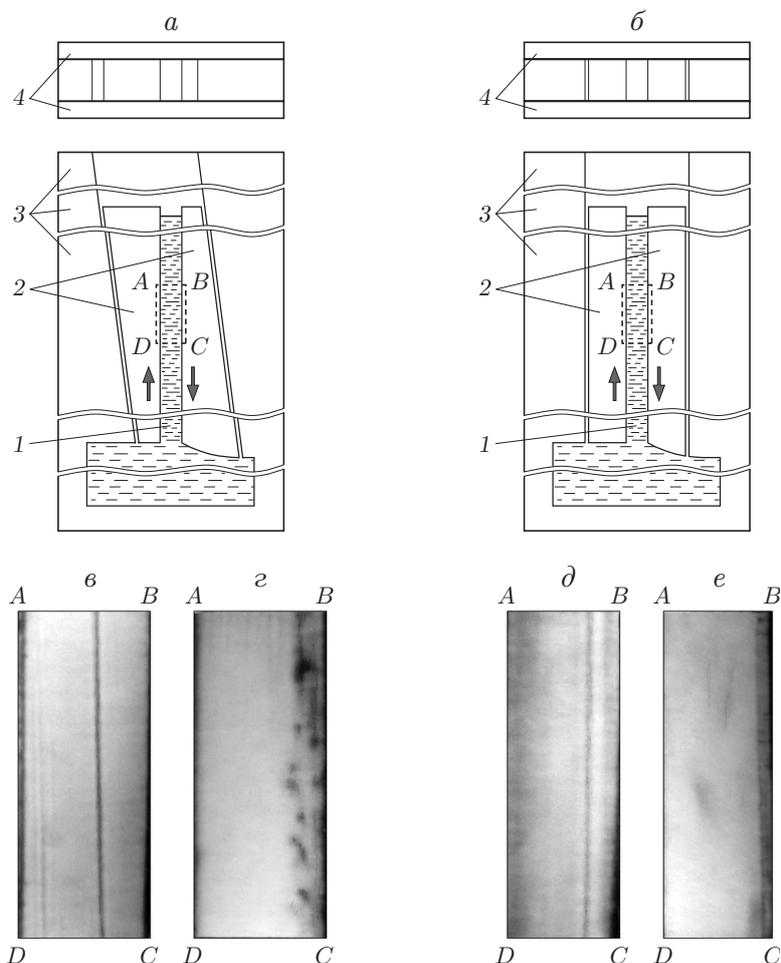


Рис. 7. Сдвиговые течения жидкостей в плоских каналах:

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, видеоманитофона 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.
