

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ С ВЛАЖНОЙ ПЕНОЙ

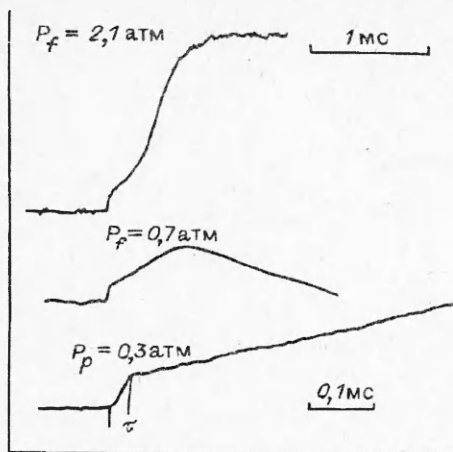
Применение водных пен в качестве экранов, эффективно демпфирующих ударные и звуковые волны в различных технологических устройствах, обусловило значительный интерес к изучению процессов распространения волн в пенных средах. Динамика сильных ударных волн и распространение звука в пене подробно изучались как экспериментально, так и теоретически [1—3]. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию возмущений промежуточной амплитуды с избыточным давлением на фронте в диапазоне между амплитудами ударных и звуковых волн.

Эксперименты проводились на вертикальной ударной трубе, подробно описанной в [4]. Здесь же отметим, что канал трубы, выполненный из прозрачного плексигласа, заполнялся слоем пены высотой H , которая варьировалась от 30 до 50 см. Средняя по объему плотность пены, приготовленной из 3 %-го водного раствора поверхностно-активного вещества (ПАВ), составляла около 50 кг/м^3 , диаметр пузырьков (определяемый по фотографиям) 0,5 мм. Для измерения профиля давления использовались миниатюрные пьезокерамические датчики (расположенные в торцевой стенке канала на расстоянии 4, 15, 26, 37 см от нее), сигнал с которых записывался с помощью осциллографов С9-8 и анализировался на персональном компьютере РС АТ 286, состыкованном с осциллографами.

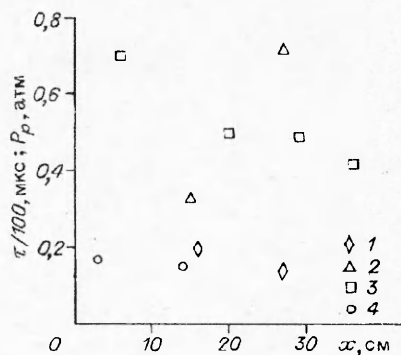
Использование различных по длине камер высокого давления позволяло получать волны с постоянным уровнем максимального давления (длинные волны) и волны, профиль давления которых имел колоколообразную форму. На рис. 1 представлены характерные профили избыточного давления; временной масштаб, показанный в правом верхнем углу, относится как к длинной (верхняя осциллограмма), так и к колоколообразной (средняя осциллограмма) волнам. Известно, что в случае длинных волн профиль давления за волной в пене формируется в результате установления равновесия между газовой и жидкой фазами потока. Величина максимума избыточного давления P_f зависит от плотности пены и связана со скоростью волны соотношениями равновесной ударной адиабаты. Волны с колоколообразным профилем, двигаясь по пене, затухают; при этом уровень максимального давления в волне быстро уменьшается [1].

В проведенных опытах как в длинных, так и в колоколообразных волнах формировался выраженный передний фронт в виде скачка избыточного давления небольшой амплитуды P_p , называемый в [1] предвестником. Измерения, проведенные с более "быстрыми" (по сравнению с двумя верхними осциллограммами рис. 1) развертками временной шкалы осциллографа, показали (нижняя осциллограмма рис. 1, временной масштаб указан в правом нижнем углу), что давление в предвестнике нарастает за время $\tau \geq 40 \text{ мкс}$, т.е. сам предвестник обладает достаточно протяженной структурой. Особенностью предвестника является то, что его амплитуда, с одной стороны, примерно втрое превышает амплитуду звуковых колебаний, с другой — ниже амплитуды слабых колоколообразных ударных волн, распространение которых во влажных ячеистых пенах изучалось в [3, 5].

Отметим, что волна в пенном слое формировалась при прохождении в слой сверху воздушной ударной волны с числом Маха $M_s \leq 1,5$. Для уменьшения влияния процессов формирования волны в пене на параметры предвестника измерения вблизи поверхности слоя проводились также в опытах с нижним положением камеры высокого давления, когда волна формировалась в нижней части слоя и двигалась по пене снизу вверх.



Р и с. 1

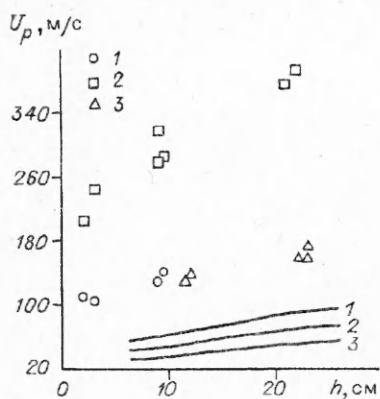


Р и с. 2

На рис. 2 точками 1, 2 отмечены результаты измерения P_p и τ соответственно при движении предвестника вниз по слою, 3 — данные опытов [5] для максимального давления в колоколообразных ударных волнах, 4 — P_p при движении предвестника вверх по слою, x — расстояние от поверхности воздух—пена. Из рис. 2 видно, что при движении предвестника вниз по слою наряду с небольшим уменьшением его амплитуды наблюдался быстрый рост величины τ . Формирование пологого профиля давления за волной происходит за счет роста τ в предвестнике, а не из-за уменьшения его амплитуды. Известно, что время нарастания давления за фронтом в двухфазной среде связано с глубиной протекания релаксационных процессов установления межфазного скоростного и температурного равновесия [6]. Продолжительность указанных процессов для слабых ударных волн во влажных пенах обычно составляет ≈ 1000 мкс [4]. Быстрая релаксация давления на лидирующем фронте волны ($\tau < 100$ мкс) указывает на окончание первой (достаточно короткой) стадии формирования параметров, связанной с прохождением по пене предвестника. По аналогии с сухими пенами [7] можно предположить, что начальная стадия релаксации отражает процесс разрушения предвестником пенных пленок.

Измерение скорости предвестника проводилось базовым методом для падающих на слой пены воздушных ударных волн с избыточным давлением на фронте от 0,3 до 1,6 атм. Несмотря на широкое варьирование интенсивности волн, параметры предвестника при этом практически не менялись. Для пенного слоя высотой 50 см скорость предвестника в средней части слоя не превышает $U_p = 140 \pm 10$ м/с, а амплитуда $P_p = 0,30 \pm 0,03$ атм. В этой же серии часть опытов проводилась с пеной из водно-глицеринового раствора ПАВ. Средняя по объему плотность пены и диаметр пузырьков сохранялись такими же, как и в водной пене; при этом вязкость раствора в 8 раз превосходила вязкость воды. Однако амплитуда и скорость как предвестника, так и самой волны в этих опытах практически не отличались от соответствующих значений в водной пене, что согласуется с выводами [8].

Суммируя сказанное, отметим, что в рассмотренных условиях параметры предвестника слабо зависели от интенсивности самой волны и вязкости пенного раствора, однако заметно изменялись при движении предвестника вдоль по слою. Известно, что такое движение происходит в условиях неравномерного по высоте профиля локальной плотности слоя пены, который формируется под действием силы тяжести [9]. Измерения скорости предвестника показали (рис. 3, точками 1, 3 отмечены результаты измерений U_p при движении предвестника вниз и вверх по слою соответственно, h — расстояние от нижнего края слоя), что независимо от направления его движения скорость была больше в верхней (более сухой) части слоя и



Р и с. 3

уменьшалась в нижней (более влажной). Таким образом, несмотря на диссипативные процессы, влияющие на параметры предвестника, распределение скорости вдоль по слою отражало изменение локальной плотности пены.

В опытах этой серии измерялось также распределение скорости предвестника U_p вдоль по слою "подсушенной" пены (результаты измерений U_p обозначены на рис. 3 точками 2). Ее средняя по объему плотность была понижена в результате предварительного отстоя пены перед выстрелом в течение 3 мин, диаметр пузырьков увеличивался в $\approx 1,5$ раза. Скорость предвестника в этих опытах также уменьшалась в направлении роста локальной плотности

пены, но более чем вдвое превосходила соответствующее значение во влажной пене.

На рис. 3 экспериментально полученные значения скорости предвестника во влажной пене сравниваются с рассчитанными по формулам [5]. Для скорости U_c равновесной волны (скоростное и температурное равновесие между газовой и жидкой фазами потока) использовалась формула

$$U_c = (P_1/P_0)^{0.5} \{P_0/(\alpha[\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l])\}^{0.5},$$

для скорости U_a адиабатической волны (скоростное равновесие и отсутствие теплообмена между фазами)

$$U_a = (P_1/P_0)\{\gamma + 1 + (P_0/P_1)(\gamma - 1)/2\gamma\}^{0.5} \{P_0/(\alpha[\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l])\}^{0.5},$$

где P_0 — начальное атмосферное давление; P_1 — максимум давления в колоколообразной волне; α — объемная доля газа в пене; ρ_g — плотность газа; ρ_l — плотность жидкости; γ — показатель адиабаты газа. Для скорости звука использовалось стандартное выражение $U_s = \{\Gamma P_0/\rho_f\}^{0.5}$ (Γ — эффективный показатель адиабаты двухфазной среды, $\rho_f = \alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l$ — плотность пены).

Расчетные формулы для скорости слабых колоколообразных ударных волн в пене в зависимости от плотности пены и максимального давления в волне получены в предположении о неразрушении пенной структуры. Авторами [5] отмечается удовлетворительное согласие расчетных результатов с опытными, полученными в широком диапазоне изменения плотности пены. Расчет скорости для неоднородного слоя требует задания распределения плотности по высоте пенного столба. В данной работе скорости волн U_c и U_a рассчитывались для трех различных сечений пенного слоя, в которых по оценкам [4] локальная плотность составляла 114, 68, 37 кг/м³ соответственно на расстояниях 4, 15, 26 см от нижней границы слоя высотой 30 см. Рассчитанные значения скорости интерполировались сплайнами. На рис. 3 кривая 1 относится к U_a при $P_1/P_0 = 1,5$; 2 — U_a при $P_1/P_0 = 1,2$; 3 — равновесная скорость звука в пене U_s . Превышение опытных данных над результатами расчета (даже в том случае, когда расчеты проведены для наиболее "быстрой" адиабатической волны с вдвое большей, чем у предвестника, амплитудой) может быть связано с несколькими неучтенными в теории эффектами. Один из них — отсутствие учета в расчетной формуле движения жидкости по каналовой структуре пены, которое (согласно [3]) должно приводить к повышению скорости распространения волны. Другая причина — возможное разрушение пены в результате движения предвестника.

Связь параметров волны, разрушающей пену, с начальной структурой пены и ее плотностью в настоящее время практически не изучалась. В [1]

отмечается, что пена оставалась в трубе после проведения опыта с ударными волнами значительной интенсивности. Разрушение сухих пен слабыми ударными волнами изучалось только в [7].

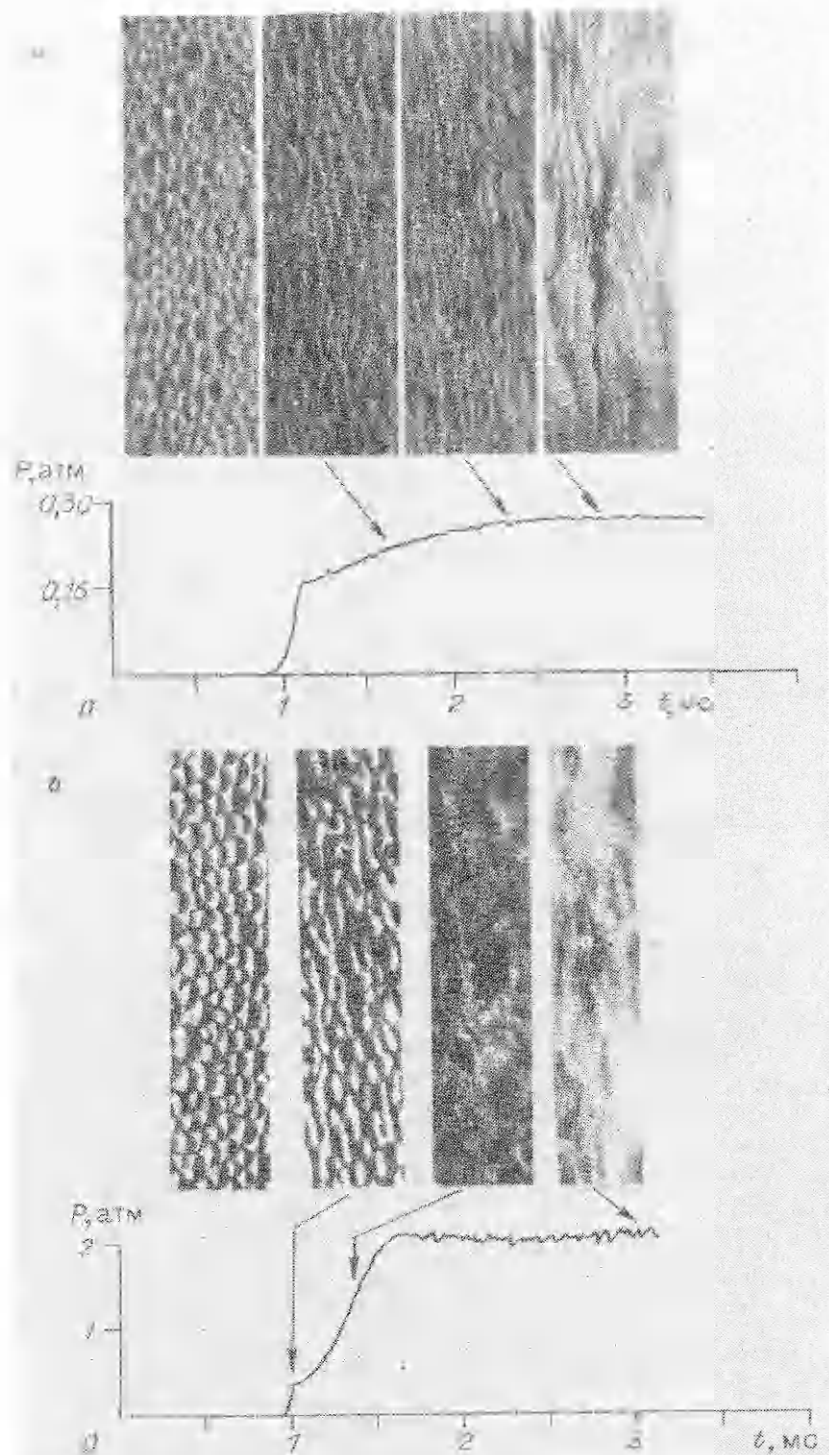
Для контроля за состоянием пены в данной работе проводилось фотографирование пенного слоя методом открытого затвора, подробно описанным в [7]. В качестве подсветки использовалось излучение второй гармоники импульсного NiG-лазера с длительностью вспышки 20 нс. Сильные светорассеивающие свойства пены позволяли получать снимки только части слоя, которая прилежала к внутренней поверхности прозрачного канала. Для синхронизации вспышки с процессом применялись пьезодатчик и линия с регулируемой задержкой.

Фотографии пены до выстрела (высота столба 50 см) и в различные моменты после прохождения предвестника представлены на рис. 4. Расположение каждой фотографии соответствует моменту вспышки подсветки, при котором получен снимок. Время задержки T отсчитывалось относительно прихода к датчику давления фронта предвестника. Экспериментальные осциллограммы давления (датчик давления расположен на расстоянии 26 см от торцевой стенки канала) приведены с соблюдением масштаба. На рис. 4 (левая фотография) видно, что средний размер пенных ячеек мало менялся от опыта к опыту, поэтому различия в поведении пены за фронтом предвестника определяются интенсивностью и профилем волны давления. (Длина кадра по высоте 9 мм. Направление движения волны на снимках сверху вниз.) В первой серии опытов (рис. 4, а, $T = 0,8; 1,7; 2,2$ мс) на слой пены падала воздушная ударная волна с постоянным уровнем давления и избыточным давлением во фронте 0,30 атм. При этом пенная структура сохранялась в течение всего времени наблюдения. Ячейки пены начинали деформироваться уже в пределах релаксационной зоны, вытягиваясь в направлении движения волны. Только на последнем снимке начинает проследиваться появление разрывов ячеек и пустот типа "карманов" на стенке трубы. Появление таких "карманов" может быть связано с начальной неоднородностью пены.

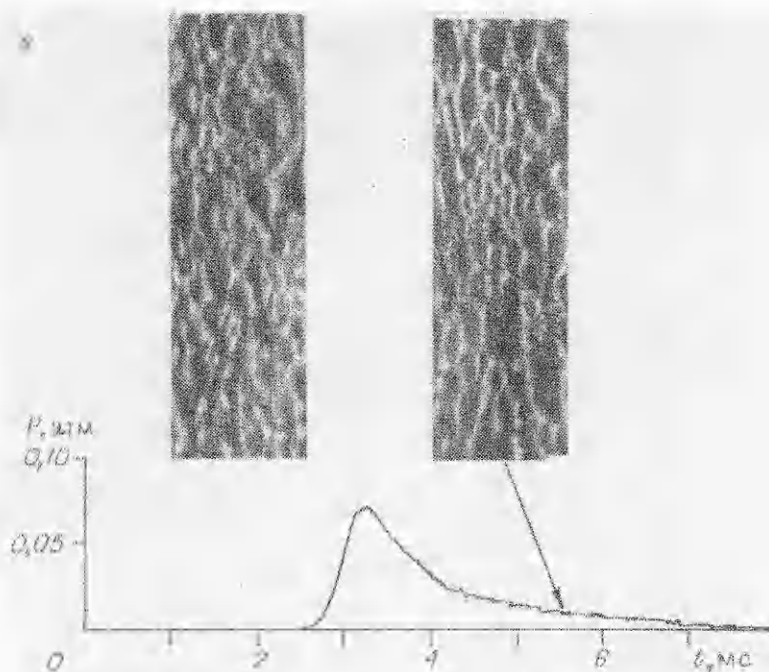
В следующей серии опытов (рис. 4, б, $T = 0,05; 0,4; 2,1$ мс) избыточное давление во фронте падающей на пену воздушной волны увеличено до 0,96 атм. При этом пена начинает разрушаться уже в пределах зоны релаксации давления. Небольшая деформация наблюдается в предвестнике, где ячейки теряют сферическую форму. Темные пятна на снимке указывают на возможное присутствие крупных капель или пленки жидкости на внутренней стенке трубы. Отметим, что в обоих случаях амплитуда длинных воздушных волн увеличивалась при преломлении в пену примерно вдвое. Приведенные снимки показывают, что эффект увеличения связан с процессами деформации и разрушения пены, при которых происходит торможение газовой фазы потока как на элементах пенной структуры, так и на образовавшихся каплях жидкости.

Фотографировался также процесс движения по пенному слою колоколообразной волны, максимальная амплитуда которой была ниже, чем у предвестника. Осциллограмма с датчика давления и фотографии пены для такой волны представлены на рис. 4, в ($T = 3$ мс). В этих опытах волна, двигаясь по пене, быстро затухала. Несмотря на деформацию пенных ячеек, разрушение, аналогичное отмеченному в предыдущих сериях, не наблюдалось даже через 1,5—2 мс после прихода максимума давления. Детальный анализ условий разрушения пены в зависимости от интенсивности и других определяющих параметров волн предполагается выполнить в дальнейшем. Здесь же отметим, что результаты данных опытов указывают на связь динамики волн с процессами изменения пенной структуры за фронтом.

Итак, в работе рассматривалось распространение слабых волн давления по влажной ячеистой водной пене. Такие возмущения сопровождаются появлением в пене переднего фронта волны, называемого предвестником, амплитуда которого лежит в диапазоне между достаточно изученными ударными и звуковыми волнами. В результате проведенных экспериментов



установлено: 1) в исследованном диапазоне параметров скорость предвестника зависела от плотности пены, а амплитуда самой ударной волны и вязкость пенного раствора практически не влияли на параметры предвестника; 2) скорость предвестника превосходит расчетную скорость слабых ударных и звуковых волн в пене, при этом распространение самого предвестника может сопровождаться нарушением начальной структуры пены;



Р и с. 4

3) для длинных волн определяющим параметром разрушения пены служит начальная интенсивность волны давления; 4) затухание слабых колоколообразных волн сопровождается деформацией ячеек при сохранении пенной структуры. Усиление преломившихся в пену длинных волн происходит при разрушении пены в релаксационной зоне нарастания давления за фронтом предвестника.

Авторы приносят благодарность В.А. Левину, В.А. Куликовскому за полезные обсуждения и С.Ю. Митичкину за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Borisov A.A., Gelfand V.E., Kudinov V.M. et al. Shock waves in water foams // Acta Astron. — 1978. — V. 5, N 4. — P. 1027—1033.
2. Баженова Г.А., Гвоздева Л.Г., Лагутов В.П. и др. Нестационарные взаимодействия ударных и детонационных волн в газах. — М.: Наука, 1986.
3. Вафина Ф.И., Гольдфарб И.И., Шрейбер И.Р. О результатах одного эксперимента по измерению скорости звука в пене // Акуст. журн. — 1992. — Т. 38, вып. 1. — С. 5—11.
4. Британ А.Б., Зиновик И.Н., Левин В.А. Распространение ударных волн по столбу пены с градиентом плотности // ПМТФ. — 1992. — № 2. — С. 27—32.
5. Ramesh V., de Krasinsky J.S. Shock and flame tube experiments. — Calgary, 1976. — (Rept / Dept Mech. Engng Univ. Calgary; N 73).
6. Ивандаев А.И., Кутушев А.Г., Нигматулин Р.И. Газовая динамика многофазных сред. Ударные и детонационные волны в газовзвесах // Итоги науки и техники. Сер. МЖГ. — 1981. — Т. 16.
7. Британ А.Б., Зиновик И.Н., Левин В.А. Разрушение пены ударными волнами // ФГВ. — 1992. — № 5. — С. 108—116.
8. Krasinsky J.S. Some aspects of the fluid dynamics of liquid-air foams of high dryness fraction // Progr. Aerospace Sci. — 1992. — V. 29. — P. 125—163.
9. Канн К.Б. Капиллярная гидродинамика пен. — Новосибирск: Наука, 1989.

г. Брест

Поступила 2/XII 1993 г.