

УДК 532.529.5

© 1995 г. И. Н. ЗИЛОВИК

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН РАЗРЕЖЕНИЯ С ВЛАЖНОЙ ПЕНОЙ

Экспериментально изучается взаимодействие волн разрежения разного профиля с влажными водными пенами. Получено, что наблюдаемое давление выше, а скорость поверхности слоя ниже соответствующих величин, рассчитанных по модели псевдогаза. Разрушение пены начиналось при уменьшении начального давления на 0,3 атм; при движении головы волны разрежения вниз по слою ее скорость уменьшалась.

Применение водных пен в качестве экранов, эффективно демпфирующих взрывные волны в различных технологических процессах, обусловило значительный интерес к изучению процессов распространения волн в таких средах. Динамика волн давления в пене подробно исследовалась как экспериментально, так и теоретически [1—3]. Взаимодействие же волн разрежения с пеной практически не изучалось, хотя отмечалось [4], что одним из факторов разрушительного воздействия взрывных волн является именно фаза разгрузки, которая следует за фазой сжатия волны. Кроме задач ослабления взрывов распространение волны разрежения по пене имеет место при использовании такой волны в качестве разрушителя пен в скважинах в нефтедобывающей промышленности [5].

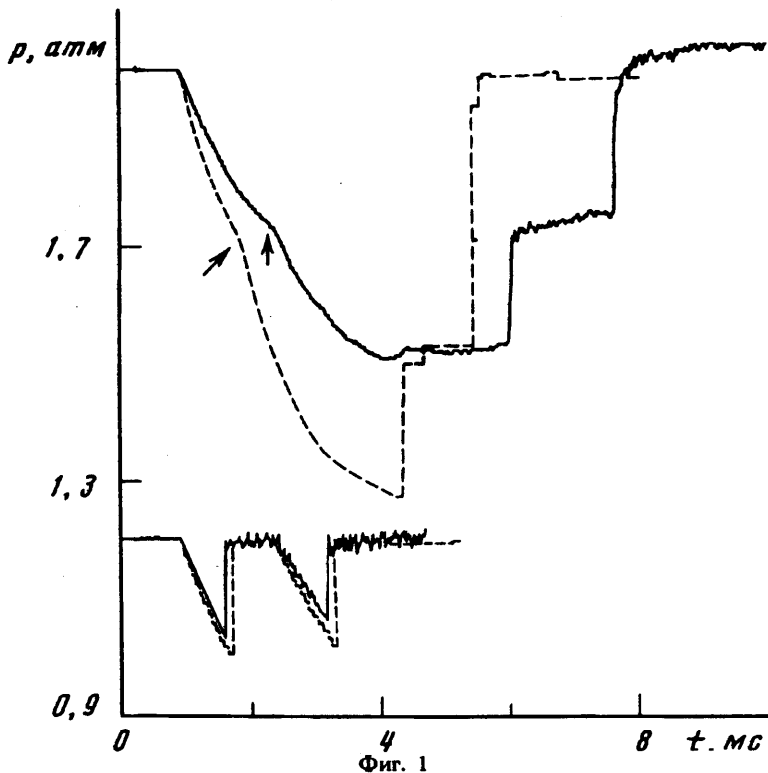
Ниже исследуется взаимодействие волн разрежения различного профиля с влажными водными пенами. Эксперименты проводились на вертикальной ударной трубе, подробно описанной в [3].

Канал трубы длиной 144 см, выполненный из прозрачного плексигласа, заполнялся слоем пены высотой H , которая варьировалась от 30 до 50 см. Средняя по объему плотность пены, приготовленной из 3%-ного водного раствора 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 и на расстоянии 4, 15, 26, 37 см от нее), сигнал с которых записывался с помощью цифровых осциллографов С9-8 и анализировался на персональном компьютере РС АТ 286, состыкованном с осциллографами.

В отличие от опытов [3] камера, пристыкованная к верхней части канала, частично заполненной пеной, откачивалась до пониженного давления, равного 0,3 атм; после чего происходило разрушение диафрагмы трубы и волна разрежения, сформировавшаяся в верхней части канала, преломлялась в пенный слой, расположенный на торцевой стенке трубы.

Для контроля за состоянием пены проводилось фотографирование пенного слоя методом открытого затвора, подробно описанным в [6]. В качестве подсветки использовалось излучение второй гармоники импульсного NiG-лазера с длительностью вспышки 20 нс. Сильные светорассеивающие свойства пены позволяли получать снимки только той части слоя, которая прилегала к внутренней поверхности прозрачного канала. Для синхронизации вспышки с процессом применялись пьезодатчик и линия с регулируемой задержкой.

Для фиксации перемещения границы пена — воздух использовалась схема из двух лазеров He—Ne и двух регистрирующих фотодиодов. Прозрачные стенки канала позволяли зондировать различные сечения потока с помощью лазерных пучков диаметром 1 мм, которые направлялись поперек трубы. Одновременные измерения по двум оптическим каналам, расположенным на расстоянии 30 и 80 мм над поверхностью слоя пены, позволяли контролировать момент прихода поверхности



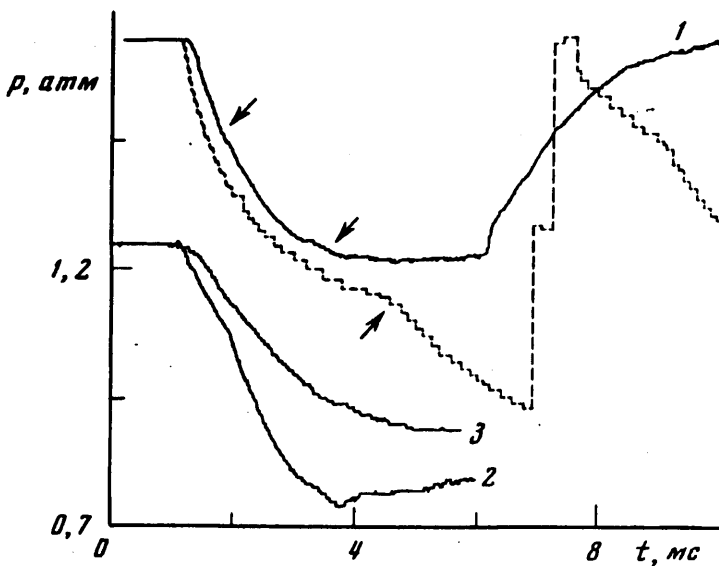
Фиг. 1

слоя в эти сечения канала: в этот момент пена полностью рассеивала излучение и экранировала фотодиоды, которые находились напротив лазеров по другую сторону канала.

Расчет параметров потока производился с помощью пакета прикладных программ для решения системы уравнений, описывающих нестационарное плоское течение идеального совершенного газа с постоянным показателем адиабаты [7]. Пенный слой моделировался слоем псевдогаза с постоянным показателем адиабаты, зависящим от доли жидкости в пене [2]. Плотность псевдогаза принималась равной средней плотности пены. Такой подход, соответствующий полностью равновесному течению двухфазной среды (когда температура и скорость жидкой фазы потока равны соответствующим значениям газовой фазы), позволяет удовлетворительно описывать зависимость амплитуды от скорости в случаях длинных ударных волн в различных пенах [1].

В калибровочной серии опыты проводились без пены в канале. Для изменения профиля волны использовались камеры длиной 80 (длинные волны) и 4 см (короткие волны). Проведенные эксперименты показали, что в измерительных сечениях длинная волна имела более пологий профиль разрежения по сравнению с соответствующими расчетными данными. При этом расчетное минимальное давление в волне было ниже измеренного на 25—30%. Ударная волна, которая, отражаясь от торцевых стенок трубы, движется вслед за волной разрежения, приходила в измерительные сечения на 1—2 мс (в зависимости от сечения) позже расчетного момента. В случае коротких волн измеренный профиль был также более пологий и минимальное давление было ниже расчетного значения. Однако небольшая (по сравнению с длинными волнами) продолжительность фазы разрежения не позволяла проявиться указанным отличиям в значительной степени. Расчетные осциллограммы датчиков давления в таких волнах отличались от опытных данных не более чем на величину погрешности измерения давления, которая составляла 6%.

На фиг. 1 представлены осциллограммы с датчика давления, расположенного



Фиг. 2

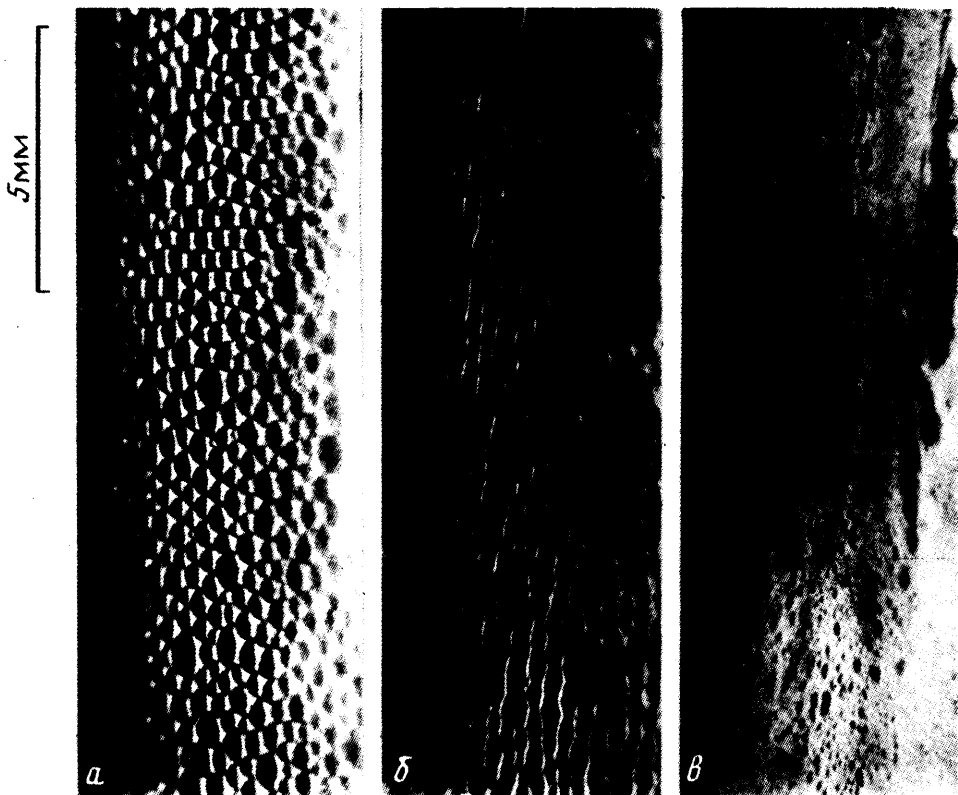
на расстоянии 26 см от торцевой стенки канала для длинных (в верхней части рисунка) и для коротких (в нижней части рисунка) волн. Штриховые линии — соответствующие расчетные данные. Стрелками отмечен приход в измерительное сечение головы волны разрежения после отражения от торцевой стенки канала.

Аналогичное отмеченному расхождение опытных и расчетных данных наблюдалось в [7] и может объясняться неидеальностью разрыва диафрагмы, которая не учитывается в расчетах. Более пологий наблюдаемый профиль возникает из-за расцентровки волны разрежения вследствие конечного времени раскрытия диафрагмы и потерь толкающего давления, что характерно для большинства ударных труб [2]. Меньший (по сравнению с наблюдаемым) расчетный уровень давления в волне разрежения приводит к тому, что распространяющаяся вслед за волной разрежения ударная волна движется с большей, чем в экспериментах, скоростью и приходит в измерительное сечение раньше, чем в опытах.

Сравнение данных для опытов с пеной и результатов расчета по модели псевдогаза показало, что в случае длинных волн во всех измерительных сечениях расчетное минимальное давление было ниже наблюдаемого на 30—40%. По сравнению же с калибровочными опытами минимальное давление в экспериментах с пеной увеличивалось на 20—30% и профиль давления в пене был более пологим.

На фиг. 2 представлены осциллограммы с датчиков давления в случае длинных волн. Цифрами 1, 3 обозначены осциллограммы с датчиков на расстоянии 26 и 15 см от торцевой стенки канала при высоте пенного слоя $H = 30$ см. Штриховой линией обозначена соответствующая расчетная осциллограмма, а цифрой 2 — осциллограмма из калибровочного опыта без пены для того же сечения, для которого получена осциллограмма 3. На расчетной осциллограмме стрелкой обозначен приход головы волны разрежения после отражения от торца канала; указанные масштабы — общие для всего рисунка.

Причиной расхождения опытных и расчетных данных может быть (кроме отмеченных особенностей разрушения диафрагмы) неравновесный характер течения в волне разрежения, в результате чего минимальное давление не достигает своей равновесной величины. Такой вывод подтверждается тем, что минимальное давление в равновесной волне разрежения в псевдогазе, моделирующем пену, ниже соответствующей величины в расчетах для воздуха; в то время как в



Фиг. 3

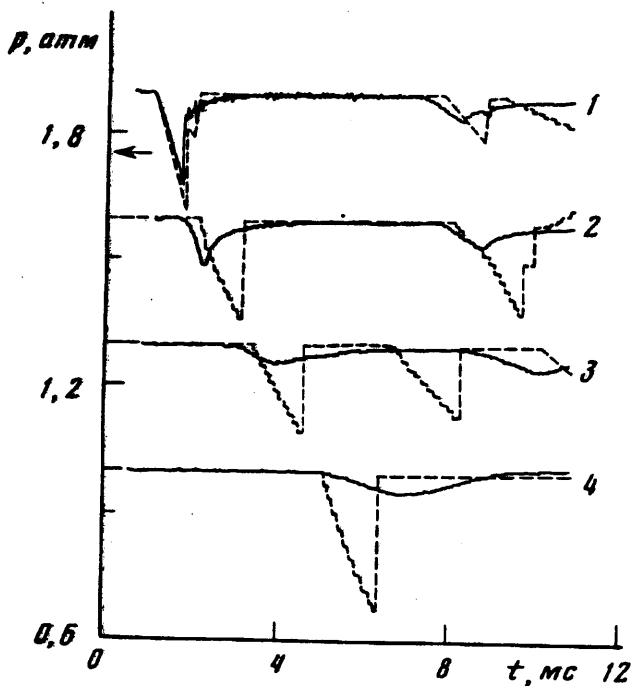
экспериментах (см. осциллограммы 2 и 3 на фиг. 2) наблюдается обратная ситуация.

После преломления волны разрежения в пенный слой пена начинала подниматься вверх по каналу. Измерения скорости движения поверхности пены проводились с помощью схемы из двух He—Ne-лазеров базовым методом. Наблюдаемая скорость движения составляла 20—30 м/с, в то время как расчетная величина скорости поверхности псевдогаза после взаимодействия с волной разрежения равнялась 76 м/с.

Под действием силы тяжести в пенном слое формируется неоднородный по высоте профиль локальной плотности [5]. В результате верхняя часть слоя имеет значительно меньшую плотность, чем плотность, средняя по всему слою. Поэтому в случае равновесного течения близкие к поверхности слоя частицы пены с меньшей плотностью приобретают скорость в волне разрежения большую, чем расчетная скорость поверхности слоя с постоянной по высоте плотностью 50 кг/м³. Наблюдаемая в опытах низкая скорость поверхности, так же как и измерения давления, свидетельствуют, что частицы пены не успевали ускоряться до своей равновесной скорости.

Суммируя сказанное, отметим, что вследствие неравновесного характера течения, наблюдавшегося в длинных волнах разрежения, отклонение максимального давления в пене от начального уровня уменьшается в отличие от опытов с длинными волнами сжатия [3], в которых уровень максимального давления в пене был выше, чем без нее.

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



Фиг. 4

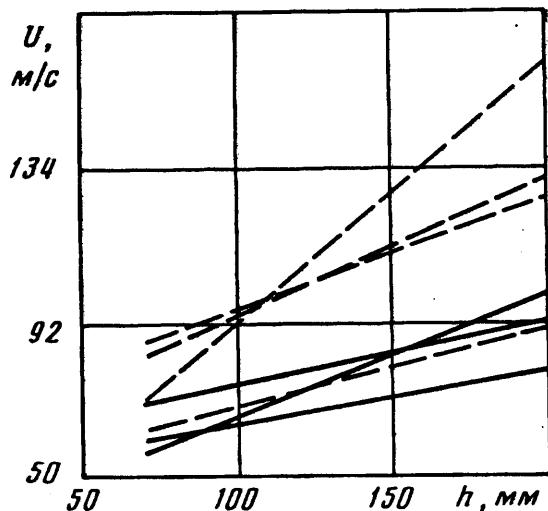
значительной интенсивности. Разрушение сухих пен слабыми ударными волнами изучалось в [6].

Результаты визуализации течения в данных опытах представлены на фиг. 3, где *а* — фотографии невозмущенной пены, *б* и *в* — снимки, полученные через 0,8 и 3,7 мс соответственно после прихода головы волны разрежения в измерительное сечение, расположенное на расстоянии 26 см от торцевой стенки канала при начальной высоте слоя 30 см. На осциллограмме 1 (фиг. 2) моменты фотографирования отмечены стрелками. Длина кадра по высоте 15 мм; направление движения волны на снимках сверху вниз.

В результате фотографирования процесса взаимодействия длинной волны разрежения с пеной установлено, что разрушению пенных ячеек предшествуют их деформация и вытягивание в направлении потока (см. фиг. 3, *б*). Деформация, объясняемая давлением на пенные пленки ускоренного волной воздуха ячеек, наблюдалась уже при уменьшении давления в волне на 0,15 атм. Разрушение начальной структуры пены в данных опытах начиналось при уровне давления ниже 0,7 атм и сопровождалось увеличением неоднородности пены, связанным с появлением вустов и уменьшением размера остальных пузырьков (см. фиг. 3, *в*).

Осциллограммы с датчиков давления (сплошные линии) и соответствующие расчетные данные (штриховые линии) для опытов с короткими волнами разрежения приведены на фиг. 4. Высота пенного слоя составляла 33 см, цифры 1—3 относятся к осциллограммам с датчиков, расположенных на расстоянии 37, 26, 14 см от торцевой стенки соответственно, цифра 4 — к датчику в торцевой стенке канала. Все осциллограммы на фигуре представлены в единой временной и координатной шкале. Стрелкой указано начальное положение поверхности пенного слоя.

Отличие расчетной амплитуды давления от наблюдаемой в пене можно (как и в опытах с длинными волнами) объяснить неравносностью течения. Вторичная волна разрежения, видимая на «хвосте» осциллограмм с датчиков, движется сверху вниз, т. е. со стороны камеры. На расчетных данных вторичная волна приходит от торцевой стенки канала, т. е. движется вверх, и является отражением



Фиг. 5

движущейся вниз по слою волны разрежения. В опытах отраженная от торца канала волна не наблюдается, по-видимому, из-за своей малой амплитуды, а вторичной волной является волна, отраженная от торцевой стенки камеры. Движение поверхности пены в опытах не зарегистрировано; расчетная величина максимального смещения поверхности под действием короткой волны разрежения составила 2 см.

Замедление распространения головы волны разрежения (см. опытные и расчетные данные фиг. 4; голова волны в расчетах движется с постоянной скоростью по однородному по высоте слою псевдогаза) объясняется так же, как и в случае ударных волн [3], изменением локальной плотности пены по высоте.

Измерение скорости U головы волны разрежения в пене проводилось базовым методом [2]. В качестве момента прихода головы волны в измерительное сечение принимался момент, при котором начальное давление уменьшалось на 0,01 атм. Ячейки пены при этом еще не начинали деформироваться. Результаты измерений скорости для $H = 30$ см приведены на фиг. 5, где h — расстояние от торца канала. Значения скорости, полученные в одном опыте на двух различных базах, соединены отрезком, абсолютная погрешность измерений оценивается ± 8 м/с. Сплошная линия относится к результатам, полученным для пены из раствора ПАВ типа ПО-6К, штриховая — для более устойчивой пены из раствора алкилсульфатов.

Голова волны разрежения, движущаяся по слою, слабо возмущает давление в пене. Значительное уменьшение скорости головы волны при ее движении вниз по слою (т. е. в направлении увеличения локальной плотности) указывает, что неоднородное распределение плотности пены по высоте влияет на динамику слабых возмущений существенным образом. Сказанное представляется важным, так как при построении модели движения слабых волн давления (избыточное давление — до 0,5 атм) по пене обычно предполагают [8], что ячейки пены не деформируются, а слой пены имеет постоянную по своей высоте плотность. Выполненные опыты показывают, что такие предположения могут нарушаться при относительно небольшой высоте пенного слоя и малом отклонении давления от начального.

В результате изучения взаимодействия волн разрежения со слоями влажной пены установлено следующее: наблюдаемое давление выше, а скорость поверхности слоя ниже соответствующих величин, рассчитанных по модели псевдогаза, что объясняется неравновесным характером течения. Разрушение пены, которому

предшествовала деформация пенных ячеек, начиналась при уменьшении начального давления на 0,3 атм; при движении головы волны разрежения вниз по слою ее скорость уменьшается вследствие неоднородного распределения локальной плотности пены по высоте слоя.

Автор благодарит В. А. Левина, А. Б. Британа за поддержку работы и С. Ю. Митичкина за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Borisov A. A., Gelfand B. E., Kudinov V. M. et al. Shock waves in water foams//Acta Astron. 1978. V. 5. № 11—12. P. 1027—1033.*
2. *Баженова Г. В., Гвоздева Л. Г., Лагутов Ю. П. и др. Нестационарные взаимодействия ударных и детонационных волн в газах. М.: Наука, 1986. 206 с.*
3. *Британ А. Б., Зиновик И. Н., Левин В. А. Распространение ударных волн по столбу пены с градиентом плотности//ПМТФ. 1992. № 2. С. 27—32.*
4. *Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия. М.: Мир, 1986. Кн. 1. 319 с.*
5. *Канн К. Б. Капиллярная гидродинамика пен. Новосибирск: Наука, 1989. 166 с.*
6. *Британ А. Б., Зиновик И. Н., Левин В. А. Разрушение пены ударными волнами//Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28. № 5. С. 108—116.*
7. *Британ А. Б., Васильев Е. И., Зиновик И. Н., Камынин И. Ю. Отражение волны взрывного профиля от торцевой стенки ударной трубы//Изв. РАН. МЖГ. 1992. № 3. С. 141—148.*
8. *Ramesh V., de Krasinski J. S. Shock and flame tube experiments//Dep. Mech Eng. Univ. Calgary. Rep. № 73. March 1976.*

Брест

Поступила в редакцию
13.I.1994