

01;05.1;07;12

©1995

ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ СОЛИТОНОВ ПРОДОЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОМ СТЕРЖНЕ

*Г.В. Дрейден, А.В. Порубов, А.М. Самсонов,
И.В. Семенова, Е.В. Сокуринская*

Недавно была предложена теория распространения продольных нелинейных волн деформации в цилиндрических упругих стержнях [1,2]. Анализ полученных результатов позволил определить начальные условия, необходимые для возбуждения уединенной волны (солитона) продольной деформации [2], а затем осуществить первые эксперименты по ее возбуждению [3]. Однако в то время отсутствовала возможность экспериментального наблюдения эволюции нелинейной волны, что не позволяло подтвердить или опровергнуть наличие основных свойств солитонов: пропорциональности амплитуды и длины волны и постоянства формы волны при ее распространении вдоль волновода. Кроме того, измерения наблюдаемой волны в [3] показали, что ее длина оказалась существенно меньше теоретической оценки длины уединенной волны [1,2]. Это несоответствие привело к необходимости уточнить теорию (см. [4]). Однако в результате была получена еще большая разница экспериментального и теоретического значений длины солитона. Все приведенные выше соображения потребовали усовершенствования методики эксперимента с целью не только наблюдения генерации, но и распространения солитона деформации на больших расстояниях и измерения его параметров.

Установка для возбуждения и регистрации солитона деформации (подробно описанная в [3]) состояла из устройства для генерации ударной волны, голографического интерферометра, служащего для регистрации волновой картины, схемы синхронизации и измерителя энергии лазерного излучения.

Солитоны в прозрачном твердотельном волноводе формировались из первичной ударной волны, возникающей в жидкости вблизи торца стержня при лазерном испарении металлизированной мишени (рис. 1). Плотность мощности лазерного излучения, воздействовавшего на мишень, контролировалась измерителем энергии и поддерживалась постоянной и равной $2.3 \cdot 10^8$ Вт/см² в течение всего эксперимента.

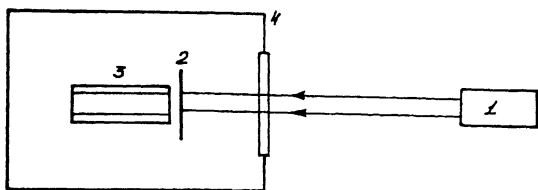


Рис. 1. Схема установки для возбуждения солитона деформации в стержне. 1 — импульсный лазер ОГМ-20; 2 — металлизированная пленка; 3 — стержень из полистирола; 4 — кювета с водой.

В настоящей работе были произведены некоторые усовершенствования методики эксперимента, расширяющие возможности регистрации исследуемых волн. А именно, для наблюдения эволюции волны был использован больший по длине стержень из полистирола длиной 149 мм вместо применявшегося ранее длиной 65 мм. Поле зрения для съемки голографических интерферограмм волны было увеличено с 24 до 50 мм. Регистрация продольной волны деформации производилась на разных расстояниях от торца стержня, получаемых перемещением кюветы со стержнем относительно пучка, регистрирующего голограмму. Эти усовершенствования позволили получить на одном кадре изображение полной волновой картины в стержне, а также зарегистрировать исследуемые возмущения в трех разных частях стержня: интервал 40–90 мм (рис. 2, а), интервал 60–110 мм (рис. 2, б) и интервал 75–125 мм (рис. 2, с) от торца стержня.

На представленных интерферограммах в стержне видна первичная ударная волна А, инициировавшая солитон сжатия, показанный на сноске под каждой интерферограммой, а также вторичная ударная волна сложной формы (резкий изгиб полос на солитоне), образовавшаяся в результате последовательного отражения первичной ударной волны в жидкости от торца стержня, затем от мишени и вошедшей в стержень (см. рис. 1).

Как видно из рис. 2, по мере продвижения по стержню ударные волны затухают, однако их скорость остается большей как скорости звука в полистироле, так и скорости солитона (от кадра к кадру солитон отстает от них). Солитон представляет собой достаточно протяженную продольную волну сжатия корытообразной формы, за которой от-

существует сколько-нибудь значительная по амплитуде волна разрежения. В жидкости, окружающей стержень, интерференционные полосы остаются горизонтальными, т. е. невозмущенными, что служит подтверждением того, что регистрируемая волна распространяется именно в стержне. Динамика движения солитона деформации на разных расстояниях ясно показывает, что форма наблюдаемой волны не претерпевает существенных изменений, что является важнейшим свойством именно уединенной нелинейной волны продольной деформации.

Приведем некоторые количественные оценки параметров наблюдаемого солитона. Характерная длина волны λ определялась непосредственно по интерферограмме. Амплитуда α солитона деформации рассчитывалась по смещению полос Δk в интерференционной картине [3]:

$$\alpha = \frac{\Delta k \lambda_1}{l_1(n-1)(1-2\nu) + 2\nu R(n-n_0)},$$

где λ_1 — длина световой волны, n — показатель преломления материала прозрачного твердого тела, n_0 — пока-

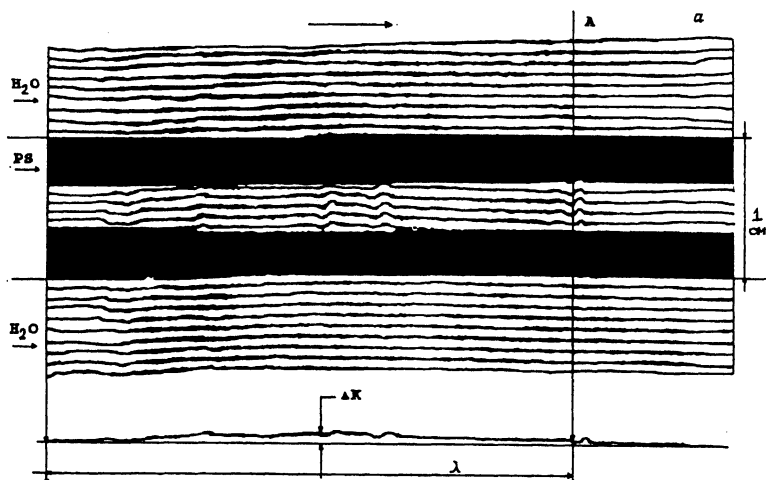


Рис. 2. Плавный длинный изгиб интерференционных полос (уединенная волна деформации) выделен и показан в сноске под фотографией всего поля зрения. a — левая граница кадра отстоит на 40 мм от входного среза стержня, правая — на 90 мм, резкий изгиб полос справа отвечает слабой ударной волне (A), вызвавшей образование солитона; b — левая граница кадра — 60 мм, правая — 110 мм, видно отставание солитона от уходящей с большей скоростью и расплывающейся ударной волны (A); c — левая граница кадра — 75 мм, правая — 125 мм, амплитуда и длина солитона не изменились; отставание от ударной волны (A) увеличилось.

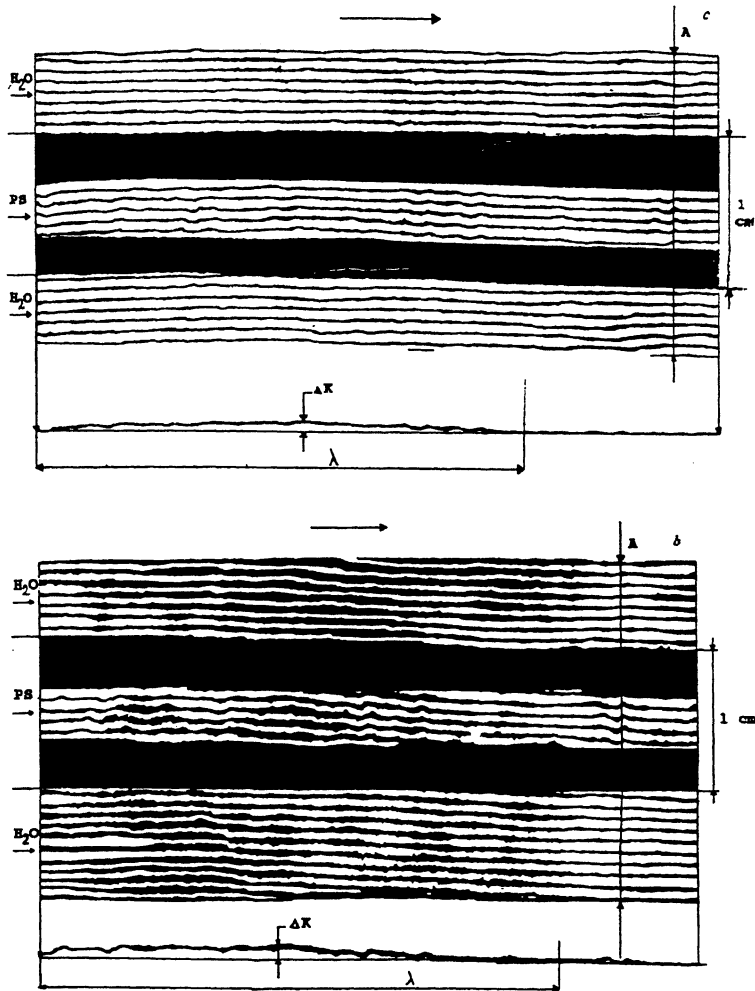


Рис. 2 (продолжение).

затель преломления воды, l_1 — толщина стержня по ходу луча (расстояние между параллельными срезами), ν — коэффициент Пуассона. Для нашего случая значения параметров таковы: $n_0 = 1.33$, $n = 1.6$, $l_1 = 7.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\lambda_1 = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Расчет параметров солитона деформации сжатия, интерферограмма которого приведена на рис. 2, а, дает следующие значения: $\alpha = 2.82 \cdot 10^{-4}$, $\lambda = 32.5 \text{ мм}$. Обработка интерферограмм, представленных на рис. 2, б, с, дает практически те же значения параметров волны. Характерные

длины уединенных волн, по исходной [1,2] и уточненной [4] теориям, по найденному в результате эксперимента значению амплитуды α равны соответственно 44.9 и 57.1 мм. Таким образом, если в [3] теоретические и измеренные значения длин волн отличались в 5 раз, то теперь, после модификации регистрирующей части установки предсказанные теорией величины не превосходят экспериментально установленных более чем на 38 и 75% соответственно. Очевидно, что сильное расхождение теории и эксперимента в [3] являлось результатом того, что уединенная волна не наблюдалась там полностью и измерения проводились по ее части, видимой в поле зрения аппаратуры. Остающееся теперь расхождение можно объяснить, в частности, тем, что солитон продольной деформации представляет собой длинную волну с нечетко выраженными фронтами. Это обстоятельство затрудняет более точное измерение ширины импульса (длины волны), хотя полученное значение кажется удовлетворительным в пределах точности измерения амплитуды солитона.

Таким образом, усовершенствована методика исследования уединенной волны продольной деформации, что позволило:

- наблюдать уединенную волну деформации на всем ее протяжении,
- получить картину ее эволюции вдоль стержня, и тем самым экспериментально показать, что эта волна действительно сохраняет свою форму и отношение амплитуды к длине, что и позволяет называть ее солитоном продольной деформации.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Международного научного фонда, грант № R56000.

Список литературы

- [1] Самсонов А.М. // ДАН СССР. 1988. Т. 299. С. 1083–1086.
- [2] Самсонов А.М., Сокуринская Е.В. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 8. С. 1632–1634.
- [3] Дрейден Г.В., Островский Ю.И., Самсонов А.М., Семенова И.В., Сокуринская Е.В. // ЖТФ. 1988. Т. 13. В. 10. С. 1237–1241.
- [4] Порубов А.В., Самсонов А.М. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 12. С. 26–29.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
20 марта 1995 г.