

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ИЗОЛИРОВАННОЙ ТРЕЩИНЫ

В. М. Кузнецов, П. А. Мартынюк, А. И. Потылицын
(Новосибирск)

Экспериментально исследовано развитие изолированной трещины.

При помощи методов фотоупругости и высокоскоростной киносъемки получены зависимости длины и скорости распространения трещины от времени. В отличие от работы Уэлса и Поста [5], проведен более детальный анализ начальной стадии развития трещин. Посредством тензодатчиков снята зависимость растягивающего напряжения от времени; экспериментальные данные достаточно удовлетворительно описываются формулой, предложенной в работе [6].

Теоретическому исследованию неустановившегося движения изолированной трещины при хрупком разрушении посвящены работы Мотта [1], Робертса и Уэллса [2], Броберга [3], Г. И. Баренблатта, Р. С. Салганика и Г. П. Черепанова [4]. Среди экспериментальных исследований этого явления отметим работу Уэллса и Поста [5].

Описываемая ниже постановка экспериментов аналогична методике, применяемой в работе [5]. Авторы этой работы исследовали поле напряжений в окрестности трещины, распространяющейся в пластинке. Фотосъемка процесса осуществлялась с подсветкой при помощи четырех последовательных искровых импульсов. Уэллсу и Посту удалось получить только три точки на графике зависимости скорости трещины от ее длины, причем в той стадии развития, когда эта скорость почти достигает своего предельного значения, составляющего в их опытах 0.38 скорости упругих волн.

Это дало возможность авторам работы [4] считать скорость трещины вообще постоянной и воспользоваться результатами Броберга, полученными при решении в точной динамической постановке задачи о движении трещины из состояния покоя с постоянной скоростью.

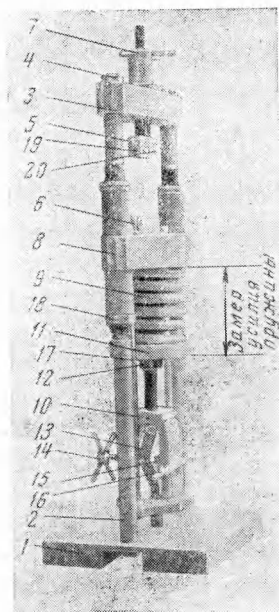
В работе Уэллса и Поста особенно хорошо выполнена оптическая часть, где при помощи методов фотоупругости довольно детально изучено напряженное состояние в окрестности носика движущейся трещины. Недостатком работы является отсутствие контроля за приложенными к пластинке усилиями и отсутствие сведений о начальном периоде развития трещины. Ниже сделана попытка устранить эти недостатки.

1. Разрывная машина. Обычные испытательные машины устроены таким образом, что нагрузка на образец медленно растет с увеличением деформации. В данном случае для получения легко обрабатываемых данных требовалось, чтобы внезапно приложенное растягивающее усилие оставалось постоянным во все время развития трещины или по крайней мере на значительном участке пути, пройденном трещиной. Для этой цели в КБ Института гидродинамики СО АН СССР инженером В. Н. Чертаковым была изготовлена специальная разрывная машина. Ее внешний вид показан на фиг. 1. Принцип работы, конструкция машины состоят в следующем.

Установка состоит из опорной плиты 1, на которой крепятся две колонны 2, скрепленные в верхней части поперечной балкой 3. Колонны на своих концах имеют резьбовой хвостовик для крепления их гайками 4 к опорной плите и поперечной балке, закрепляются образцы двумя захватами.

Верхний захват 5 имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении с помощью гайки 7 в зависимости от длины испытываемого образца и для предварительного выбора люфтов в силовой цепи установки. Нижний захват 6 совместно с подвижной траверсой 8, спиральной пружиной 9 и взводным устройством 10 составляет автономный узел нагружения.

Весь узел имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении для установки предполагаемой линии разрыва в поле зрения регистрирующей аппаратуры. Узел нагружения имеет отдельную силовую систему, нагружаемую пружиной 9, которая опирается одним концом в приточку подвижной траверсы 8, другим концом — в тарелку 11, которая, в свою очередь, удерживается гайкой 12, навинченной на хвостовик нижнего захвата 6. Регулировка усилия, прилагаемого к захватам, производится путем навинчивания гайки 12 на хвостовик



Фиг. 1

вик, т. е. предварительным сжатием пружины 9. Чтобы заранее установленное усилие на пружине можно было передать на испытуемый образец, в установке предусмотрено взводное и спусковое устройство.

Взводное и спусковое устройство включено в общую силовую систему, связанную с подвижной траверсой и включающую в себя нижний захват 6 с резьбовым хвостовиком; на конце хвостовика профрезерована проушина для подсоединения двухзвенного взводного механизма 13. Взводное и спусковое устройство 10 представляет собой жесткую раму, в противоположных вертикальных стенках которой располагается винт 14 для взведения пружины 9 в рабочее состояние и спусковой шток 15 с рычагом спуска 16.

Двухзвенный механизм 13 представляет собой две пластины, соединенные между собой шарнирно. Верхний конец подсоединяется с помощью оси к хвостовику нижнего захвата 6, а нижний конец взводного механизма закрепляется шарнирно на внутренней поверхности основания рамы взводно-спускового устройства. Для замыкания силовой цепи при взводе нагружающей системы взводно-спусковое устройство шпильками 17 соединяется с подвижной траверсой 8, а во избежание отклонений от соосности системы в нижней части рамы взводно-спускового устройства имеется цилиндрический хвостовик, свободно перемещающийся в отверстии основания 1.

Для смягчения удара нижнего захвата о подвижную траверсу после разрыва образца в траверсе сделано цилиндрическое углубление, в котором расположена шайба из вакуумной резины, прикрытая сверху металлической шайбой. Таким образом, удар нижнего захвата по траверсе смягчается резиновым амортизатором. Для установки захватов в соответствии с длиной испытуемых образцов и для сохранения линии разрыва в одной плоскости предусмотрено перемещение подвижной траверсы 8 в вертикальном направлении при помощи гаек 18, при этом перемещается силовая и взводно-спусковая системы, которые связаны с траверсой. Крепление образцов в захватах производится посредством накладной губки 19 и болтов 20. Начальное усилие, прикладываемое к испытуемому образцу, можно устанавливать заранее в пределах от 0 до 2000 кг перемещением гайки 12 по хвостовику нижнего захвата.

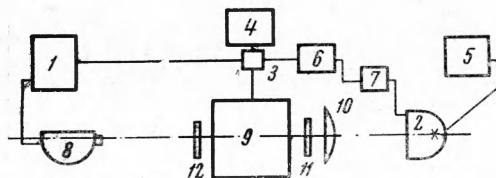
2. Методика эксперимента. В качестве исследуемого материала использовались пластинки из оргстекла, размерами $220 \times 110 \times 3$ мм. В каждом образце перед испытанием создавалась искусственная трещина длиной 3—4 мм. Съемки производились в поляризованном свете при помощи скоростного фоторегистра СФР-2М в покадровом режиме со скоростью 250 000 кадр/сек.

Блок-схема установки изображена на фиг. 2. Здесь 1 — пульт управления, 2 — импульсная лампа ИФК-2000 с отражателем, 3 — разрядник, 4 — силовая батарея конденсаторов для подрыва проволоки, 5 — батарея конденсаторов импульсной лампы, 6 — блок задержки, 7 — импульсный генератор, 8 — СФР-2М, 9 — разрывная машина с образцом, 10 — линза, 11, 12 — поляроиды.

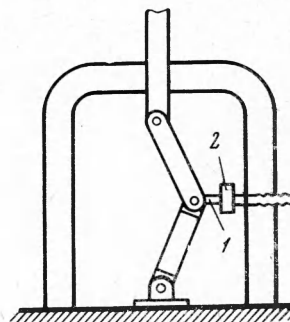
Основная трудность экспериментов заключается в синхронизации запуска СФР с началом развития трещины. Предварительные исследования показали, что с начала запуска разрывной машины до начала роста трещины проходит время порядка 2.2—2.6 м.сек.

Кроме этого надо было синхронизовать начало роста трещины с началом положения зеркала фоторегистра, а также с моментом вспышки лампы-подсветки.

Для этой цели запуск разрывной машины производился следующим образом. Спусковой механизм пружины 13 опирался на плексигласовый стержень (фиг. 3), внутри которого была расположена медная проволока диаметром 0.2 мм. Эта проволока включалась в цепь батареи конденсаторов. При подрыве проволоки стержень разрушался, после чего срабатывал спусковой механизм разрывной машины.



Фиг. 2

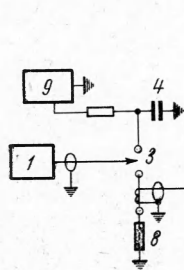


Фиг. 3

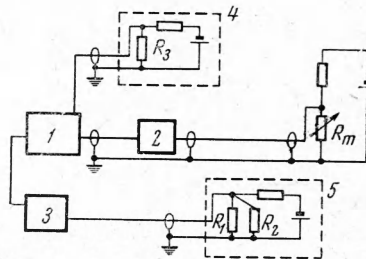
Общая электрическая схема установки изображена на фиг. 4. При запуске СФР выдаваемый им высоковольтный импульс через разрядник 3 соединял силовую батарею конденсаторов 4 (12 мкф, 25 кВ) с проволокой 8 внутри стержня и через блок задержки 6 — с импульсным генератором 7 и импульсной лампой (ИФК-2000)-вспышкой

2; при этом на схеме 1 — пульт управления, 2 — импульсная лампа ИФК-2000, 3 — разрядник, 4 — силовая батарея конденсаторов $12 \text{ мкф} - 25 \text{ кв}$, 5 — батарея конденсаторов импульсной лампы $800 \text{ мкф} - 1 \text{ кв}$, 6 — блок задержки, 7 — импульсный генератор, 8 — столбик из органического стекла с проволокой, 9 — зарядное устройство «Тесла» ВС-222, 10 — зарядное устройство УПУ-1М.

Специальное исследование показало, что с момента нажатия кнопки запуска на пульте 1 управления СФР, т. е. фактически от начала разрушения плексигласового стержня до начала роста трещины проходит время порядка $2.5 \text{ мсек} \pm 200 \text{ мсек}$. Исходя из этого, блок задержки 6 включал импульсную лампу-вспышку 2 несколько раньше начала движения трещины. Опережение составляло $100-150 \text{ мсек}$ при времени свечения лампы $450-500 \text{ мсек}$.



Фиг. 4



Фиг. 5

Начальная установка угла зеркала фоторегистра выбиралась из тех же соображений, так что опережение составляло 2.5 м.сек . Изменяя длину стержня, можно в известных пределах варьировать время задержки срабатывания разрывной машины. Поляроиды 11, 12 применялись в основном для более точной отметки положения носика трещины.

Кроме киносъемки развития трещины производились измерения напряжений на пластине. Это осуществлялось с помощью тензодатчиков типа ПКБ 5—100, приклеенных к испытываемым пластинкам.

Электрическая схема измерений изображена на фиг. 5. Здесь 1 — осциллограф ОК-17М, 2 — катодный повторитель, 3 — генератор импульсов Г5-15, 4 — цепь запуска осциллографа, 5 — цепь запуска генератора импульсов (R_1 — начало, R_2 — конец трещины), $R_1 - R_3$ — сопротивления проводящих пленок, нанесенных на разрез (порядка $3-5 \text{ ком}$), R_T — тензодатчик.

Сигнал тензодатчика через катодный повторитель (коэффициент усиления системы катодный повторитель — усилитель осциллографа порядка $4 \cdot 10^4$) подавался на один луч осциллографа ОК-17М. На втором случае отмечались моменты начала развития трещины и выхода ее на свободную поверхность пластинки. Сигналы начала и конца развития трещины получались при разрыве узких проводящих пленок, нанесенных на поверхности пластинки перед носиком первоначальной трещины и у противоположной стороны пластинки.

3. Результаты экспериментов. Кадры киносъемки процесса развития трещины приведены на фиг. 6. Промежутки времени между кадрами составляют 8 мсек . Результаты обработки экспериментальных данных приведены на фиг. 7 в виде графиков зависимости длины 1 и скорости 2 трещины от времени. Характер осциллографической записи растягивающего напряжения от времени 1 вместе с тарировочной кривой 2 тензодатчика показан на фиг. 8. Каждая ступень тарировочной кривой соответствует увеличению нагрузки на 200 кг . Резкий спад нагрузки связан с приходом к тензодатчику волны разгрузки от трещины и отраженной волны от еще не разрушенного края пластинки.

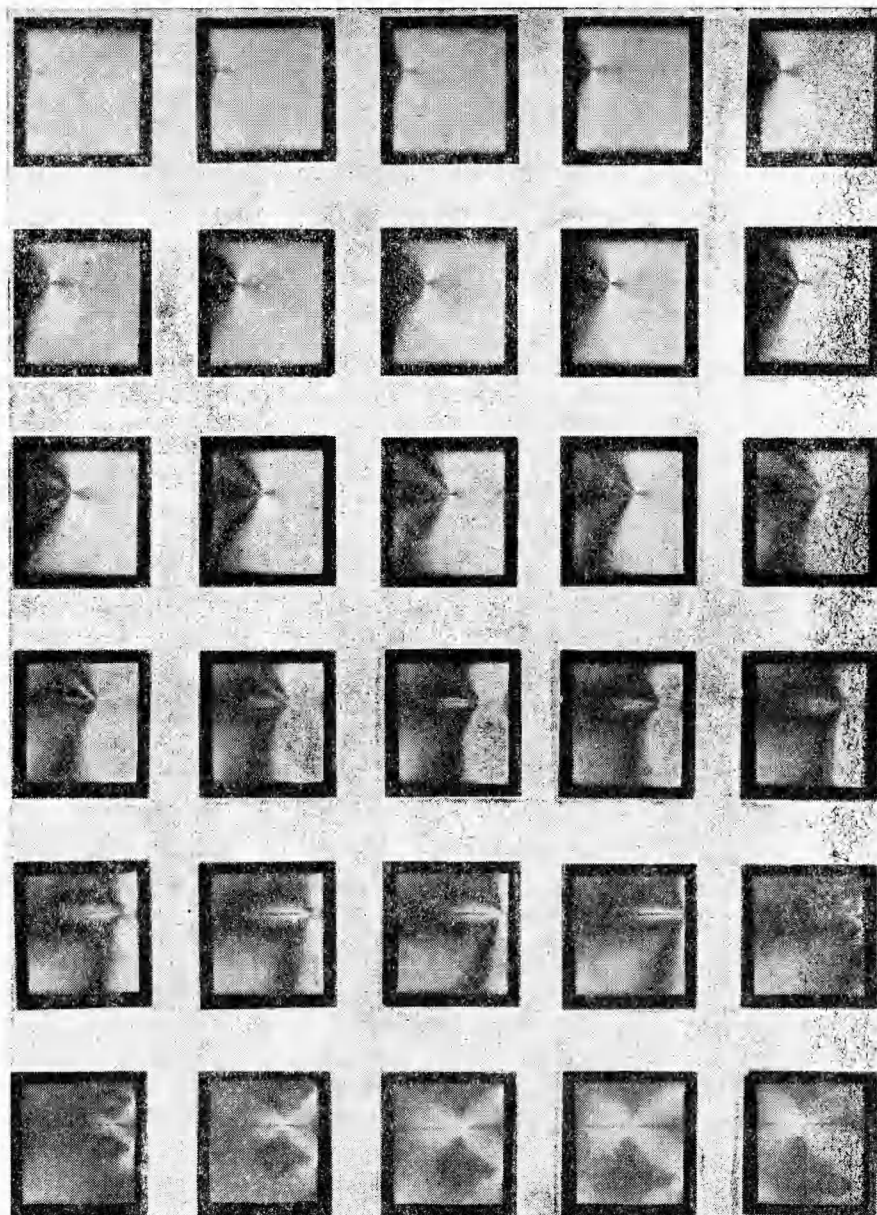
4. Анализ результатов. Формула Мотта, уточненная Робертсом и Уэллсом, имеет вид

$$V = 0.38 \left[\frac{E}{\rho} \left(1 - \frac{l_0}{l} \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

Здесь l_0 — первоначальная длина трещины, l — текущая длина трещины. Формула, предложенная в работе [6], имеет вид

$$V = c_0 \left[1 - \left(\frac{l_0^*}{l} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Здесь c_0 — скорость релеевских волн, l_0^* — длина трещины, находящейся в равновесном состоянии при данной величине растягивающего напряжения. Отметим, что различие между этими двумя выражениями состоит не только в небольшом различии



Фиг. 6

постоянных коэффициентов и в виде функциональной зависимости, но в разном смысле величины l_0 . В согласии с общепринятыми представлениями теории хрупкого разрушения [7,14] равновесная длина трещины связана с величиной растягивающего напряжения p формулой Гриффитса, которая для случая трещины, выходящей на границу полупространства, имеет вид [8]

$$l_n^* = 1.61 \frac{K^2}{p^2} \quad (3)$$

где K — модуль сцепления.

Длина равновесной трещины l_0^* , соответствующая статической прочности материала на растяжение σ_* , определяется аналогичной формулой

$$l_0^* = 1.61 \frac{K^2}{\sigma_*^2} \quad (4)$$

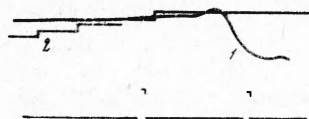
Таким образом, при напряжениях, превышающих прочность, длина равновесной трещины меньше, чем при статическом нагружении

$$l_0^* = l_0^0 \left(\frac{\sigma_z}{P} \right)^2 \quad (5)$$

В свою очередь, длина трещины l_0^0 определяется соотношением между теоретической и фактической прочностью материала [9] и по порядку величины при чистом хрупком механизме разрушения равна

$$l_0^0 \sim 10b \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_*} \right)^2$$

Здесь $b \sim 10^{-8}$ см — межатомное расстояние, σ_T — теоретическая прочность, равная примерно 0.1 модуля Юнга. По справочным данным [10] для термопластичных пластмасс, к которым относится оргстекло, прочность на разрыв составляет $(0.28 - 0.70) \cdot 10^9$ дин/см², а модуль Юнга — $(0.14 - 0.28) \cdot 10^{11}$ дин/см². Таким образом, получается, что l_0^0 очень малая величина — порядка $(0.2 - 1.0) \cdot 10^{-6}$ см. Однако в таком расчете допущена серьезная ошибка. Дело в том, что для большинства материалов при развитии трещин существенную роль играют локальные пластические деформации, сосредоточенные в тонком приповерхностном слое трещины.



Фиг. 8

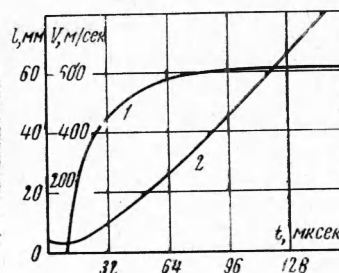
Как показали Ирвин и Орван [11,12], при квазихрупком разрушении удельная работа пластической деформации может на несколько порядков превышать величину обычного коэффициента поверхностного натяжения, равного удельной работе, затрачиваемой на разрыв внутренних связей. Эффективное значение величины поверхностного натяжения, определенное из экспериментов по расклиниванию плексигласовых образцов, равно 12000 кал/см², что соответствует модулю сцепления, равному 150 кал/см². Оргстекло, используемое в наших опытах, имело прочность на разрыв $500 \text{ кг/см}^2 \pm 10\%$. Измеренные значения модуля Юнга и плотности равны соответственно $E = 2.8 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$, $\rho = 1.13 \text{ г/см}^3$. По данным [13], скорость продольных волн в оргстекле составляет 2800 м/сек. Пользуясь известными соотношениями для скорости продольных c_1 и поперечных c_2 волн

$$c_1 = \left[\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{1/2}, \quad c_2 = \left[\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)} \right]^{1/2}$$

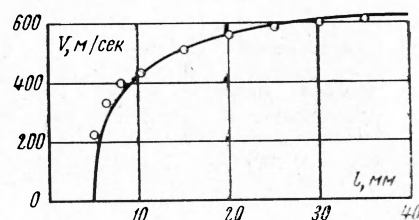
получаем значение коэффициента Пуассона $\nu = 0.435$ и скорость поперечных волн $c_2 = 900 \text{ м/сек}$. Скорость релеевских волн составляет примерно 0.9 скорости поперечных волн. Таким образом, в нашем случае можно принять $c_0 = 800 \text{ м/сек}$. При деформации пластинок имеем дело с плоским напряженным состоянием; в этом случае модуль сцепления следует вычислять по формуле $K_1 = K \sqrt{1-\nu^2}$. Поэтому вместо величины 150 следует взять 135 кг/см^2 . Подставляя в (4) значение K и σ_* , получаем $l_0^0 = 1.1 \text{ мм}$.

Для определения величины l_0^* по (5) следует определить величину растягивающего напряжения. Как видно из осциллограммы фиг. 8, p , вообще говоря, изменяется со временем. Для простоты расчетов примем, однако, что p имеет постоянное значение, равное некоторому среднему. По осциллограмме фиг. 8 общее растягивающее усилие меняется от 600 до 950 кг. Пусть среднее значение равно 775 кг. В пересчете на единицу площади (ширина пластинки 11 см, толщина 0.3 см.) это дает для напряжения p величину 235 кг/см^2 . По формуле (5) имеем $l_0^* = 5 \text{ мм}$.

На фиг. 9 приведена кривая 2, при этом приняты $c_0 = 800 \text{ м/сек}$, $l_0^* = 5 \text{ мм}$, и нанесены экспериментальные точки, полученные по кинокадрам фиг. 6 и графику фиг. 7. Совпадение экспериментальных данных с расчетами можно считать вполне удовлетворительным.



Фиг. 7



Фиг. 9

ЛИТЕРАТУРА

1. Mott N. F. Fracture of metals; theoretical consideration. Engineering, 1948, vol. 165, pp. 16—18.
2. Roberts D. K., Wells A. A. The velocity of brittle fractures. Engineering, 1954, vol. 178, pp. 820—821.
3. Broberg K. B. The propagation of a brittle crack. Arkiv fys., 1960, vol. 18, pp. 159—192.
4. Баренблатт Г. И., Салганик Р. Л., Черепанов Г. П. О неустойчивом распространении трещин. ПММ, 1962, т. 26, № 2.
5. Wells A. A., Post D. The dynamic stress distribution surrounding a running crack — a photoelastic analysis. Pro. Exper. Stress Analysis, 1958, vol. 16, No. 1.
6. Кузнецов В. М. О нестационарном распространении системы трещин в хрупком материале. ПМТФ, 1968, № 2.
7. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении. ПМТФ, 1961, № 4.
8. Irwin G. R. The crack extension force for a crack at a free surface boundary. NRh Rept, 1958, No. 5120.
9. Атомный механизм разрушения. М., Metallurgizdat, 1963.
10. Кей Дж. В., Лэби Т. Г. Таблицы физических и химических постоянных. М., Физматгиз, 1962.
11. Irwin G. R. Fracture dynamics. In «Fracture of metals», ASM, Cleveland, 1948, pp. 147—166.
12. Orowan E. O. Fundamentals of brittle behavior of metals. In «Fatigue and Fracture of Metals», N. Y., Wiley, 1950, pp. 139—167.
13. Адушкин В. В., Сухотин А. П. О разрушении твердой среды взрывом. ПМТФ, 1961, № 4.
14. Irwin G. R. In Handbuch der Physik, Springer, Berlin, 1958, Bd 4, pp. 551—558.

Замечания. В статье В. В. Арсентьева «К теории импульсных разрядов в жидкой среде», ПМТФ, 1965, № 5

В формуле (3.2) И. З. Окунем обнаружена ошибка. Напечатано

$$\frac{d}{dt} \int_a^R \frac{\rho_0 u r dr}{1 - a^2/R^2} = a p_a$$

Формула же должна иметь вид

$$\frac{d}{dt} \int_a^R \frac{\rho_0 u r dr}{1 - a^2/R^2} = a p_a + \int_a^R p dr - R p_r$$

В. В. Арсентьев признает просмотр, и одновременно с этим обращает внимание, что формула (3.2) используется в статье для получения соотношения

$$a' = 0.8 (p_a / \rho_0)^{1/2}$$

которое хорошо аппроксимирует экспериментальные результаты статьи [2] (нумерация ссылок взята из списка литературы обсуждаемой статьи) и теоретические расчеты [16]. Поэтому соотношение

$$a' = 0.8 (p_a / \rho_0)^{1/2}$$

может быть взято в качестве исходного независимо от неверного равенства (3.2).

Редакция благодарит И. З. Окуня за замеченную неточность в статье нашего журнала.