

## О ВЗРЫВЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

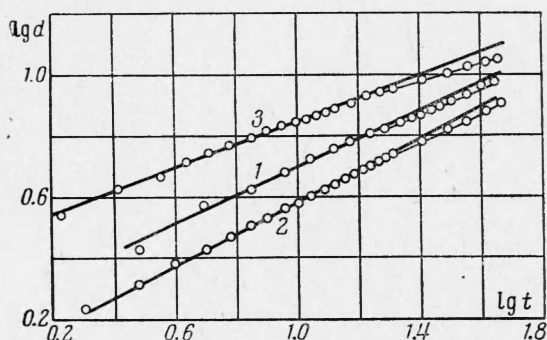
В. Ф. Минин

(Новосибирск)

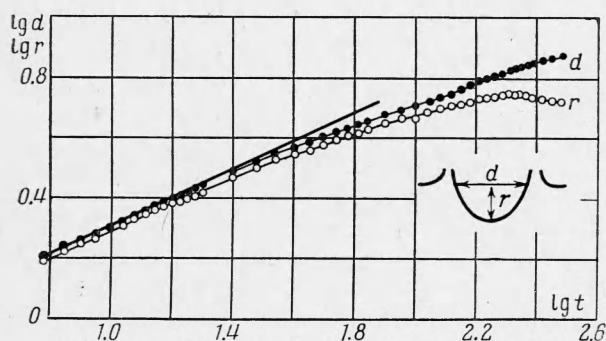
В работе [1] рассматривается постановка задачи о движении идеальной несжимаемой и невесомой жидкости бесконечной глубины, вызванном взрывом на ее поверхности. В качестве основного параметра, характеризующего действие взрыва на жидкость, принимается импульс, полученный жидкостью. В этом случае при автомодельном движении график зависимости размера воронки от времени, построенный в логарифмическом масштабе, для цилиндрического взрыва должен представлять прямую с угловым наклоном, равным  $1/3$ , что подтверждается экспериментальными, приведенными в работе [1]. Ниже приводятся результаты экспериментального исследования, посвященного этому вопросу.

## 1. Цилиндрический взрыв.

Взрыв производился путем разряда батареи конденсаторов емкостью  $50 \mu F$ , заряжаемых до напряжения  $3 kV$  через нихромовую проволоку длиной  $40 \text{ мм}$ , а диаметром  $0.09 \text{ мм}$ . Разряды производились в баке с жесткими стенками размером  $1100 \times 550 \times 20 \text{ мм}$ . Окна из оргстекла толщиной  $40 \text{ мм}$ , встроенные в стенки бака, позволяли производить оптическую регистрацию явления. Проволочка устанавливалась перпендикулярно к большим граням бака. Начальный уровень свободной поверхности жидкости фиксировался линией, нанесенной на окно бака. Движение жидкости после взрыва регистрировалось скоростной киносъемкой на камере СФР-1 в начале процесса, а в более позднее время камерой Пентазет 16. Скорость съемки во время эксперимента контролировалась и была строго постоянной



Фиг. 1



Фиг. 2

в течение времени регистрации явления, что позволило обрабатывать эксперименты, считая за единицу времени один кадр.

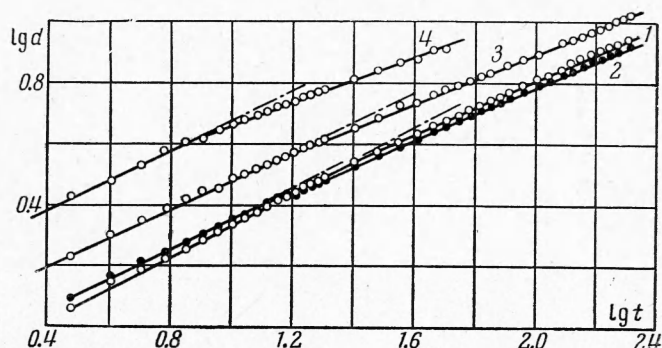
В результате обработки экспериментов начальной стадии взрыва (скорость съемки  $2 \cdot 10^5$  кадров в сек) на фиг. 1 построена зависимость диаметра  $d$  (мм) воронки на уровне свободной поверхности от времени  $t$  (сек) (в логарифмических координатах, фиг. 1а); экспериментальные точки лежат вдоль прямой 1; в более поздней стадии взрыва (скорость съемки  $3000$  кадров в сек) до времени, равному  $10^{-2}$  сек, зависимость также близка к прямой 2. Угловым наклоном прямых, получаемых из эксперимента, изменяется от  $0.45$  до  $0.48$ , со средним значением для  $20$  опытов  $0.47$ .

Спустя  $10^{-2}$  сек экспериментальные точки отходят вниз от прямой. Ускорение  $a$  стенки воронки на уровне свободной поверхности, определенное после взрыва, оказалось равным

$$a = 11 \text{ g при } t = 1 \cdot 10^{-2}, \quad a = 5.5 \text{ g при } t = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ сек}, \quad a = 3 \text{ g при } t = 2 \cdot 10^{-2} \text{ сек}$$

Поэтому представляется вполне очевидным фактом, что начиная с времен, больших чем  $0.01$  сек, воронка перестает быть геометрически подобной в процессе движения (фиг. 2, где  $d$  и  $r$  в мм). Таким образом, на дальнейшее движение жидкости существенное влияние оказывает ускорение силы тяжести, что не учитывалось в работе [1], где при условиях опыта, описываемого здесь, экспериментальные точки лежат на прямой с угловым наклоном  $1/3$ , начиная с времени приблизительно  $5 \cdot 10^{-2}$  сек, т. е. в области, где весовость существенна

Найденная закономерность устойчива относительно малой вариации заглубления проволочки. При проверке производились взрывы как над свободной поверхностью, так и под ней. Существенных различий в движении жидкости при этом обнаружено не было; кроме того, что при взрыве над поверхностью размер воронки в фиксированный момент времени в несколько раз меньше, чем при заглублении проволочки, что представляется очевидным фактом. Для того чтобы проследить за движением жидкости за больший промежуток времени, чем  $0.01 \text{ сек}$ , при отсутствии силы тяжести, была построена экспериментальная установка, представляющая собой падающую платформу с установленными на ней баком размерами  $560 \times 300 \times 20 \text{ мм}$  и кинокамерой. Это



Фиг. 3

устройство позволяло регистрировать движение невесомой жидкости в течение  $0.3 \text{ сек}$ : на фиг. 3 этому случаю соответствует кривая 1, а для сравнения приведена кривая 2, полученная в аналогичных условиях, что и кривая 1, но с тяжестью. При экспериментах скорость съемки была  $2000 \text{ кадров в сек}$ . Кривая 1 до момента времени  $0.02 \text{ сек}$  оказалась также близкой к прямой с угловым коэффициентом, равным  $0.47$ .

При опытах с различными энергиями взрыва, производимого на поверхности невесомой жидкости, выяснилось, что, начиная с некоторого размера воронки движение жидкости существенно зависит от размеров бака. Это можно проиллюстрировать кривыми 1, 3, 4 на фиг. 3, где видно, что излом кривых происходит при одном и том же размере воронки, приблизительно равном  $1/8$  размера бака. Для проверки этого предположения были произведены эксперименты в баке длиной  $260 \text{ мм}$  и энергией взрыва, соответствующей взрыву, представленному на фиг. 3 кривой 1. При этом оказалось, что излом кривой начинается раньше и соответствует моменту времени, когда размер воронки приблизительно равен  $1/8$  размера бака.

Таким образом, изучить движение безграничной невесомой жидкости, вызванное взрывом на ее поверхности, за время, большее чем  $0.02 \text{ сек}$ , при имевшихся размерах бака не представлялось возможным.

Для плоского взрыва на поверхности жидкости оказалось возможным получить в эксперименте поле скоростей в жидкости в различные фиксированные моменты времени, что производилось следующим образом.

Вода в ванне заменялась соляным раствором, в который подмешивались частицы канифоли размером  $0.1-0.3 \text{ мм}$ . Концентрация соли в воде подбиралась такой, что удельный вес раствора и канифоли были одинаковы. Жидкость после взрыва освещалась импульсной лампой ИФК-120, и фотографировались фотоаппаратом с открытым затвором на фотопластинку размером  $18 \times 24 \text{ см}$ . Момент времени съемки задавался следующим образом.

При подаче напряжения на взрываемую проволочку запускался генератор прямоугольных импульсов ГИП-2, который формировал одиночный прямоугольный импульс заранее заданной длительности. После дифференцирования этого импульса обрезался сигнал, соответствующий переднему фронту, а сигналом с заднего фронта запускался тиратрон, срабатывающий на импульсный трансформатор, который поджигал лампу — вспышку. Таким образом, момент съемки определялся длительностью прямоугольного импульса и мог быть выбран от  $10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-2} \text{ сек}$ . Время срабатывания схемы не превышало  $10^{-7} \text{ сек}$ . Экспозицию при фотографировании, по желанию, можно было изменять в пределах от  $10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$ , путем изменения параметров формирующей линии, составленной из индуктивностей и емкостей и питающей импульсную лампу.

Однако в приведенных экспериментах экспозиция оставалась постоянной и равна  $10^{-3} \text{ сек}$ . Съемки поля скоростей производились до времени  $10^{-2} \text{ сек}$ , т. е. в диапазоне, где еще тяжесть не существенна, а энергия взрыва подбиралась такой, что влиянием стенок бака можно было бы пренебречь.

На фиг. 4 приведена фотография поля скоростей при времени от начала взрыва до начала экспозиции снимка  $2.5 \text{ мсек}$ , которая была получена при взрыве на поверхности. На фотографии нанесены линии, проведенные таким образом, чтобы траектории частиц канифоли, заснятые на фотопластинку, были касательными к этим линиям в каждой точке. Считая время экспозиции снимка малым, о приведенных кривых можно говорить как о линиях тока, что, конечно, будет некоторым приближением. Эксперименты показали, что, как и следовало ожидать, семейство линий тока, снятых в различные моменты времени с шагом по времени в  $1 \text{ мсек}$  до времени, прошедшем от начала взрыва  $10^{-2} \text{ сек}$ , т. е. до времени, когда в наших условиях жидкость можно считать еще невесомой, остается геометрически подобной с точностью, получаемой при обработке снимка.

Указанный факт не относится к брызговому струям, т. е. к той области течения, где нарушается сплошность жидкости.

Из приведенных снимков поля скоростей можно судить о потенциале, реализующемся при движении жидкости. Оказалось, что вид потенциала в достаточно грубом приближении близок к тому, который дают источник, помещенный в центр взрыва, и два стока половинной интенсивности, помещенные симметрично относительно источника под углом  $45^\circ$  к свободной поверхности, на расстоянии  $1.75r$  от центра взрыва, где  $r$  — глубина воронки.

Необходимо заметить, что найденный вид потенциала течения не претендует на точное описание движения жидкости и в некотором смысле носит скорее качественный, чем количественный характер.

На фиг. 4 показана форма свободной поверхности, реализующейся при взрыве.

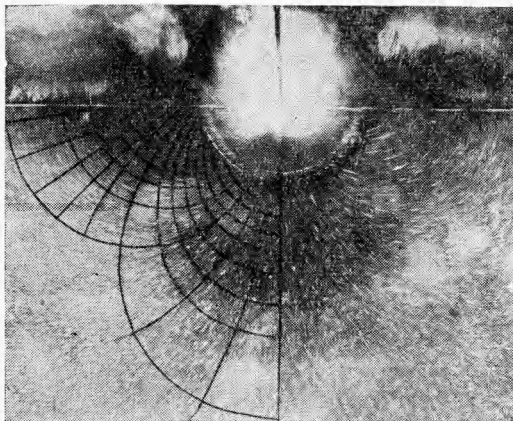
Внутренность воронки, ниже начального уровня жидкости, по форме близка к круговому полуцилиндру с отношением диаметра к глубине от 2.2 до 2.36.

**2. Точечный взрыв на поверхности воды.** Взрыв производился в баке из оргстекла, имеющего размеры  $600 \times 500 \times 400 \text{ мм}$ . Батарея конденсаторов в этом случае заряжалась до  $3 \text{ кВ}$  и разряжалась через плоскую спираль диаметром  $3 \text{ мм}$ , изготовленную из проволоки диаметром  $0.09 \text{ мм}$ . Такой плоский заряд устанавливался точно на поверхности жидкости. Регистрация явления производилась при помощи скоростной кино съемки с частотой съемки 2000 кадров в  $\text{сек}$ .

Результаты экспериментов оформлялись в виде графиков в координатах, указанных выше. Один из таких опытов представлен на фиг. 1 (кривая 3), где видно, что экспериментальные точки лежат на прямой с угловым наклоном, близким к 0.4 до времени  $6 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$ . Средний угловой наклон для 20 опытов равняется 0.38, что также не вяжется с импульсной постановкой задачи, из которой следует, что для случая точечного взрыва угловой наклон должен равняться 0.25.

Таким образом, из проведенных экспериментов можно заключить, что движение невесомой жидкости, вызванное взрывом на ее поверхности, за исключением брызговых струй, близко к автомодельному с показателем автомодельности  $\alpha = 0.47$  для цилиндрического взрыва и  $\alpha = 0.38$  для точечного.

Экспериментальный закон движения воронки, приведенный в работе [1], не соответствует движению невесомой жидкости.



Фиг. 4

Поступила 23 X 1963

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дерibas А. А., Похожаев С. И. Постановка задачи о сильном взрыве на поверхности жидкости. Докл. АН СССР, 1962, т. 144, № 3.