

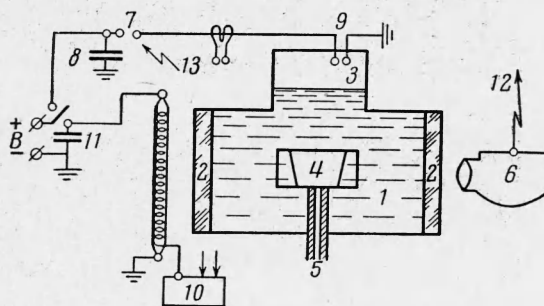
ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СХЛОПЫВАЮЩЕЙСЯ ГАЗОВОЙ ПОЛОСТИ
ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

В. К. Кедринский, Г. М. Пиголкин

(Новосибирск)

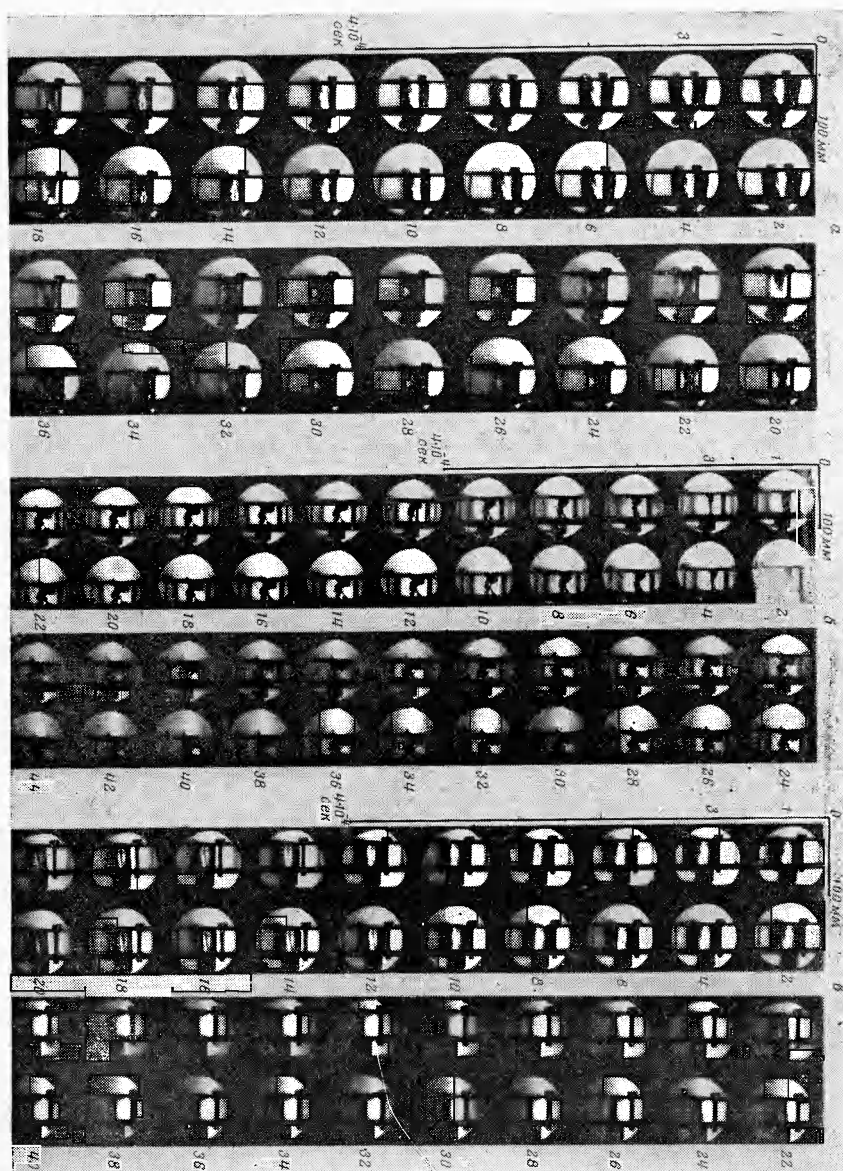
Работа, в основном, посвящена экспериментальному исследованию устойчивости формы схлопывающейся газовой полости, образованной вращающимся жидким объемом и заполненной воздухом или смесью ацетилена с кислородом. В последнем случае определялось влияние воспламенения смеси в момент максимального сжатия на устойчивость формы полости при ее последующем расширении. В конце сделана попытка построения некоторых схем наблюдаемых явлений.

Опыты проводились на установке, представленной на фиг. 1. Рабочая камера представляла собой цилиндр 1 с прозрачными торцами 2, заполненный водой. Камера высокого давления 3 с 50%-ной смесью ацетилена с кислородом отделялась от рабочей камеры мембраной. Основная рабочая часть установки — «вертушка», представляющая собой две параллельные пластины, жестко скрепленные четырьмя тонкими ребрами. Нижняя пластина сидит на валу 5 с отверстием для впуска газа. При подаче газа через отверстие в валу во время вращения между пластинами образуется полость 4. Движение стенок полости фиксировалось скоростным фоторегистром 6. В момент открытия затвора фоторегистра синхронизирующий импульс поджигает воздушный промежуток 7 в цепи конденсатора 8, который разряжаясь на промежуток 9, поджигает смесь. При разрядке конденсатора 8 пояс Роговского помещенный в цепь этого конденсатора, запускает импульсный трансформатор 10, который, в свою очередь, запускает импульсную лампу, стоящую в цепи конденсатора 11.



Фиг. 1

На фиг. 2а приведен типичный снимок пульсации газовой полости. Развертка процесса — сверху вниз, полость несколько скошена на конус. Момент схлопывания четко виден на девятнадцатом кадре. Полость в момент максимального сжатия представляет собой пережатый по центру цилиндр. Сжатие неустойчиво, и при следующем расширении полость значительно размывается. На этом снимке приведен случай сжатия полости, заполненной смесью ацетилена с кислородом (момент воспламенения хорошо виден на восемнадцатом и девятнадцатом кадрах). Факт воспламенения газа определяется по самосвечению, зафиксированному в момент максимального сжатия без подсветки процесса. Повторение вышеуказанного эксперимента для случая полости, наполненной воздухом, показало, что



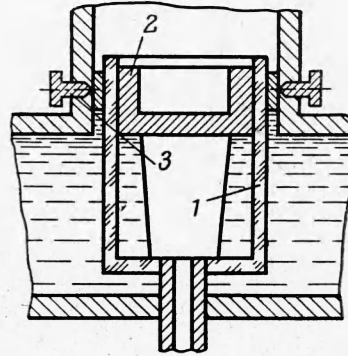
Фиг. 2

влияние воспламенения смеси внутри полости существенно не сказывается на последующем расширении. Фиг. 2б изображает конечный момент схлопывания и последующее расширение воздушной полости (начальный радиус в этом случае несколько меньше предыдущего). Как видно из снимка, неустойчивость в этом случае сильнее. Причина заключается в уменьшении минимального радиуса и, как результат этого, в сильном нарушении центровки в момент максимального сжатия. В подобных случаях всегда наблюдалось полное разрушение полости.

Помещением «вертушки» в прозрачный полый цилиндр удалось добиться значительного улучшения устойчивости (фиг. 2в). Однако приведенная

выше схема эксперимента не давала возможности улучшить устойчивость увеличением скорости вращения жидкости из-за появляющихся вихрей. Установка над «вертушкой» решетки позволила лишь незначительно увеличить скорость, так как появление мелких вихрей приводило к неустойчивости начальной формы газовой полости.

Значительно увеличить скорость вращения и избавиться от вихрей удалось вращением всей системы «сосуд — жидкость» и введением поршня (фиг. 3). Вместо «вертушки» устанавливается прозрачный цилиндр 1 с поршнем 2. Между поршнем и дном цилиндра наливалась вода. Регулируя впуск газа под поршень при вращении цилиндра, получали полость 3 желаемых размеров. Скорость вращения цилиндра порядка 30 оборотов в сек., начальное давление смеси во взрывной камере менялось в пределах 200—500 мм рт. ст., высота полости 10—80 мм, диаметр полости — 40—70 мм. На фиг. 4а приведен типичный снимок сжатия полости сплошным (по диаметру цилиндра) поршнем. Сжатие происходит двумя путями: по радиусу и по высоте. Особенно отчетливо это видно на фиг. 4б. В направлении движения поршня по поверхности полости движется волна сжатия, напоминающая «бор» на мелкой воде. Естественно, при таком очень неустойчивом сжатии расширение полости приводит к полному ее разрушению. Очевидно, для устойчивости необходимо сохранять высоту полости при сжатии. Для этого сплошной поршень заменяется кольцевым (фиг. 5). В этом случае полость сжимается симметрично, форма полости остается в процессе пульсации близкой к цилиндрической, поверхностные волны незначительны (фиг. 4в).



Фиг. 3

В результате экспериментального исследования выявлена принципиальная возможность получения достаточной устойчивости стенок при схлопывании.

Рассмотрим кратко некоторые схемы осесимметричного течения первоначально закрученной жидкости со свободной поверхностью.

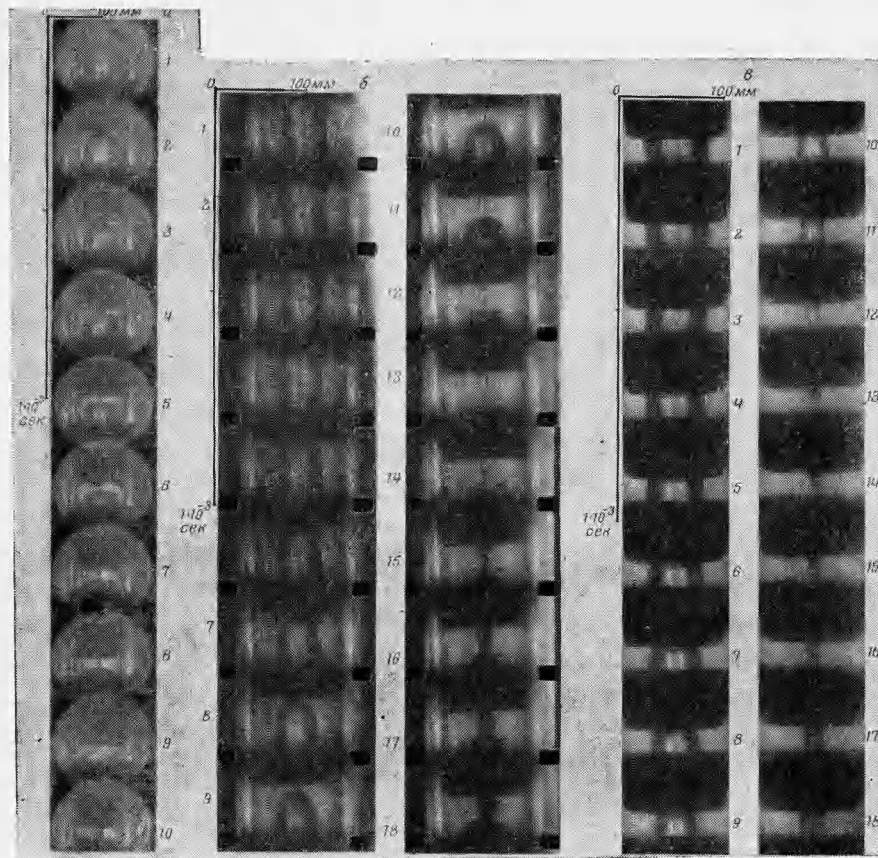
Жидкость вращается вместе с цилиндрическим сосудом радиуса R , как твердое тело с постоянной угловой скоростью ω . При вращении внутри жидкости образуется полость, близкая к цилиндрической. Пренебрегая вязкостью, считаем, что каждая частица сохраняет момент импульса N относительно оси цилиндра. Назовем эквипотенциальными поверхности, образующие которых удовлетворяют уравнению

$$N(r, x, t) = \text{const}$$

где r и x — соответственно радиальная и осевая координаты. Если образующие эквипотенциальных поверхностей имеют малый наклон к оси и слабо зависят от времени, то приближенное решение аналогично тому, которое получается в теории мелкой воды, причем

$$c = \omega \frac{r_0^2}{\xi^2} \left(\frac{R^2 - \xi^2}{2} \right)^{1/2}$$

Здесь c — скорость слабых возмущений, аналогичная скорости звука



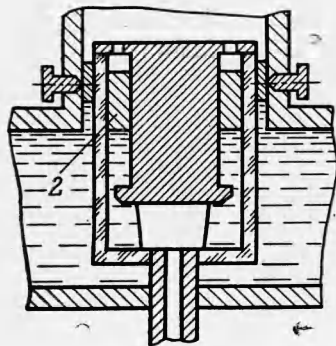
Фиг. 4

в газодинамике, ξ и r_0 — соответственно текущий и первоначальный радиусы полости, R — внутренний радиус сосуда.

Это решение дает простую волну, приводящую к образованию скачка. Течение, иллюстрируемое фиг. 4 а, б, напоминает течение со скачком. Уравнение движения в осесимметричном случае удовлетворяется при

$$u = \text{const}, \quad v = 0, \quad N = N(r, t)$$

где u и v — соответственно осевая и радиальная скорости. Следовательно, течение со скачком теоретически возможно. Однако интегральные соотношения в нашем случае не дают возможности определить скорость скачка в зависимости от его амплитуды и параметров движения перед скачком.



Фиг. 5

Изучение экспериментальных данных показало, что, в отличие от разрывных течений на мелкой воде, здесь имеем свободную поверхность без каких-либо следов турбулентности. Однако легко показать, что течение, при котором на бесконечностях свободная поверхность имеет различные значения радиуса, не может всюду удовлетворить уравнениям Эйлера.

Следовательно, зона турбулентного движения должна существовать где-то внутри жидкости, так, чтобы свободная поверхность не турбулировалась.

Предположим, что турбулентная зона примыкает к зоне регулярного течения. Скачок движется при этом в сторону зоны регулярного течения. На свободной поверхности примыкание может осуществляться только по окружности минимального радиуса. Приняв все эти предположения, получим отсутствие турбулентности на свободной поверхности и выражение для скорости скачка

$$D = \omega \frac{r_0}{\xi_0} \frac{R^2 - \xi_0^2}{\sqrt{2R^2 - r_0^2 - \xi_0^2}}$$

где D — скорость скачка, ξ_0 — минимальный радиус свободной поверхности. Осевая скорость за скачком определяется из условия сохранения массы жидкости

$$(u - D)(R^2 - \xi_0^2) = -D(R^2 - r_0^2)$$

Вопрос о существовании упомянутого регулярного течения встретил значительные трудности и остается открытым.

Таким образом, для случая со сплошным поршнем критерий устойчивости формы полости при сжатии аналогичен условию адиабатичности сжатия газового объема

$$u \ll C$$

где u — скорость поршня. При $u \sim C$ (фиг. 4а, б) $u \approx C \approx 4$ м / сек получаем неустойчивое движение со скачком.

В случае с кольцевым поршнем схлопывающаяся полость наиболее устойчива по форме. Однако авторам не удалось найти физически приемлемую модель движения, расчет которой был бы достаточно прост и в то же время давал удовлетворительное объяснение устойчивости формы полости.

Авторы признательны Б. В. Войцеховскому и Р. И. Солоухину за внимание к работе.