

03

Влияние турбулентного перемешивания на динамику жидкого слоя, ускоряемого сжатым газом

© И.Г. Жидов, Е.Е. Мешков, Н.Н. Невмержицкий,
И.Г. Пылев, Е.Е. Сотсков

Российский федеральный ядерный центр,
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров
E-mail: root@gdd.vniief.ru

Поступило в Редакцию 10 сентября 2001 г.

Приведены результаты экспериментального исследования влияния турбулентного перемешивания (ТП) на неустойчивой границе жидкого слоя, ускоряемого давлением горячего сжатого газа, на эффективность последующей передачи энергии слою газа, сжимаемому жидким слоем.

Обнаружено, что ТП может приводить к значительному снижению отбора энергии жидким слоем на стадии его ускорения (за счет охлаждения "горячего" сжатого газа вследствие увеличения передачи тепла от газа к жидкости в зоне ТП). Эксперименты показывают, что потери энергии могут достигать значительных масштабов (десятки процентов).

В работе [1] Забабахин Е.И. показал возможность достижения неограниченной кумуляции ударной волны, распространяющейся в плоской автомодельной слоистой системе — системе тяжелых слоев, отделенных прослойками легкого вещества. Если плотность легких слоев очень мала, то при движении они сильно сжимаются между соседними тяжелыми слоями и движение системы становится подобным ряду соударений тяжелых слоев через упругие прослойки. Как показывают описанные ниже эксперименты, турбулентное перемешивание (ТП) на границах контактирующих сред в таких кумулирующих слоистых системах, возникающее при интенсивном ускорении границ разноплотных сред, может оказывать существенное влияние на процессы кумуляции энергии.

В работе [2] приведены результаты экспериментального исследования влияния ТП на динамику жидкого слоя, ускоряемого сжатым

газом. При ускорении жидкого слоя сжатым газом граница между этим газом и жидкостью оказывается неустойчивой (неустойчивость Рэлея–Тейлора [3]), развитие неустойчивости приводит к образованию и развитию зоны ТП. Описаны эксперименты, в которых было реализовано течение в плоской системе: жесткая стенка — слой сжатого газа 1 — жидкий слой–газ 2 (воздух при атмосферном давлении и комнатной температуре). В качестве газа 1, ускоряющего исследуемый слой, использовался сжатый гелий при комнатной температуре (“холодный” газ) или сильно нагретые продукты взрыва смеси ацетилена с кислородом (“горячий” газ). Исследования проводились на основе сравнения динамики слоев одинаковой массы из: а) воды, б) студня водного раствора желатина с малой концентрацией C и соответственно с малой прочностью ($C = 4.4\%$, условное разрушающее напряжение $\sigma \approx 0.005 \text{ МПа}$ ¹) и в) слоев из студня с полностью подавленным перемешиванием (за счет относительно высокой прочности слоя, $C = 35\%$, $\sigma \approx 0.2 \text{ МПа}$). Такие слои названы “стабилизированными”.

В экспериментах [2] наблюдались как относительное увеличение скорости слоев из воды и студня ($C = 4.4\%$; в опытах с “холодным” газом) и слоев из студня ($C = 4.4\%$; в опытах с “горячим” газом) по сравнению со “стабилизированными” слоями вследствие уменьшения эффективной толщины жидкого слоя (“проедаемого” зоной перемешивания в процессе ускорения), так и относительное уменьшение скорости слоев из воды (в опытах с “горячим” газом) вследствие интенсивной теплоотдачи от высоконагретого газа к воде в зоне ТП.

Ниже описаны эксперименты с плоской системой; жесткая стенка 1 — слой сжатого газа 1 — жидкий слой — слой сжимаемого газа 2 — жесткая стенка 2 (рис. 1). В этом случае газ 1 — продукты взрыва смеси ацетилена с кислородом, газ 2 — воздух при комнатной температуре и атмосферном давлении. В качестве жидкого слоя использовались вода и студень ($C = 4.4\%$); для сравнения проводились опыты со “стабилизированными” слоями.

Слой конденсированного вещества (вода, студень, стабилизированный слой) толщиной 1.8 см помещался в прозрачный, открытый сверху,

¹ Характерное давление продуктов взрыва смеси ацетилена с кислородом ($P \sim 1 \text{ МПа}$) намного превышает прочность подобного студня и в целом слой ведет себя как жидкий, однако эта незначительная прочность оказывает существенное влияние на структуру зоны турбулентного перемешивания на неустойчивой границе слоя, уменьшая глубину проникновения зоны ТП в газ [2]. При этом глубина проникновения зоны ТП в случае слоя студня такая же, как и в случае слоя воды.

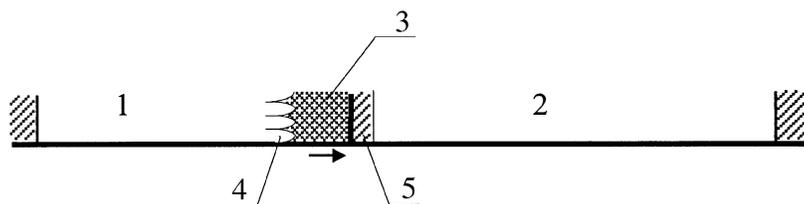


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по сжатию объема воздуха слоем конденсированного вещества, ускоренным сжатым газом. В качестве "горячего" сжатого газа использовались продукты взрыва смеси ацетилена с кислородом; ускоренный контейнер со слоем сжимает атмосферный воздух в замкнутом объеме канала. Обозначения: 1 — сжатый газ (ПВ ГВС); 2 — сжимаемый газ (воздух), 3 — ускоряемый слой; 4 — граница неустойчива на стадии ускорения слоя, 5 — неустойчивость подавлена.

контейнер (стакан), который ускорялся в прозрачном цилиндрическом канале диаметром 5 см продуктами взрыва (ПВ) стехиометрической смеси ацетилена с кислородом $C_2H_2 + 2.5O_2$ ($P \sim 1$ МПа). Масса контейнера со слоем составляла 60 г. Во всех опытах различие между массами слоев, силами трения контейнера о стенки канала и давлением ускоряющего газа составляло соответственно $0.1 \div 0.2\%$. В каждой постановке проводилось несколько опытов.

Регистрация процесса ускорения и последующего торможения контейнера вплоть до остановки велась скоростной киносъемкой.

В жесткой стенке 2 в конце канала был вмонтирован пьезоэлектрический датчик, регистрирующий давление сжимаемого слоя воздуха, который в начальный момент времени находился при нормальных условиях. Кроме этого, давление воздуха оценивалось по $S(t)$ диаграмме движения дна контейнера (полученной при обработке кинограмм), при этом предполагалось, что процесс сжатия является адиабатическим. В процессе отработки методики экспериментов была достигнута высокая степень воспроизводимости результатов измерений $S(t)$ — разброс не превышал $\sim 1 - 2\%$.

Таким образом, в этих экспериментах энергия ускоряющего газа переходила в кинетическую энергию ускоряемого слоя, которая на стадии сжатия воздушного объема контейнером переходила во внутреннюю энергию сжимаемого газа.

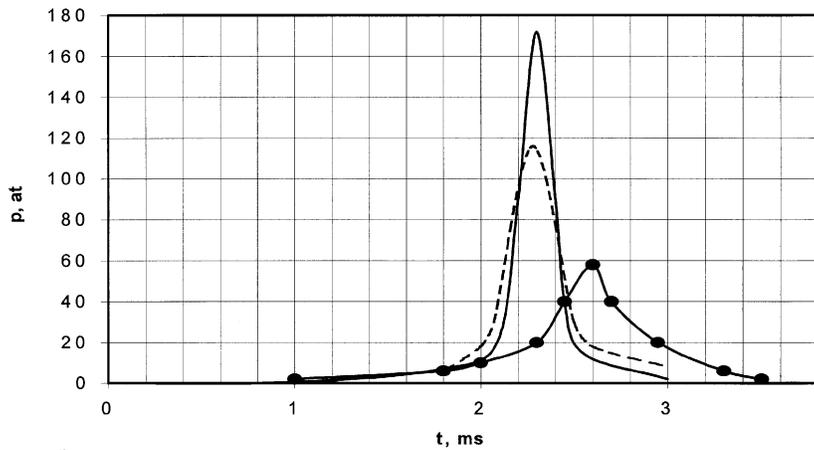


Рис. 2. Зависимости от времени t давления P сжимаемого воздуха, полученные с помощью датчика давления; сплошная линия — эксперимент со стабилизированным слоем; штриховая линия — со слоем студня; линия, помеченная маркерами — со слоем воды.

На рис. 2 приведены результаты измерения пьезодатчиком давления воздуха, сжатого контейнерами со стабилизированным слоем, слоем студня и слоем воды.

Для одного и того же типа слоя $P(t)$, полученные разными способами, близки, но величина давления максимального сжатия для разных слоев различна: самое высокое ($P_{\max} \approx 180$ at) — в случае стабилизированного слоя, ниже ($P_{\max} \approx 140$ at) — для слоя студня и еще ниже ($P_{\max} \approx 60$ at) — для слоя воды. Кроме этого, время максимального сжатия воздуха в случае слоя воды примерно на 25% больше, чем в случае стабилизированного слоя и слоя студня.

Оценим энергию, вносимую ускоряемыми слоями в сжимаемый газ.

Относительное изменение энергии сжимаемого газа:

$$k = (E_m - E_0)/E_0, \quad (1)$$

где E_m и E_0 — конечная и начальная энергия сжимаемого газа.

Считая воздух идеальным газом, процесс адиабатическим ($\gamma = 1.4$), учитывая:

$$E = PV/(\gamma - 1) \quad \text{и} \quad PV^\gamma = \text{const},$$

выразим k как:

$$k = (P_{\max}/P_0)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1, \quad (2)$$

где P_0 — начальное давление газа.

Различие в отборе энергии от ускоряющего газа слоями с ТП, по сравнению со стабилизированным слоем, можно характеризовать величиной δ_e относительного различия энергии, вносимой в сжимаемый газ:

$$\delta_e = (\langle k \rangle_1 - \langle k \rangle_{2/3}) / \langle k \rangle_1. \quad (3)$$

Эта величина характеризует относительные "потери" энергии. Скобки $\langle k \rangle$ означают усреднение по совокупности опытов в одинаковой постановке. Индексы "1, 2, 3" — результаты, относящиеся к опытам с разными слоями: 1 — стабилизированный слой; 2 — вода; 3 — студень.

По этой оценке величина относительных потерь энергии в приведенных экспериментах составила: для слоев студня $\delta_e = 0.17 \pm 0.1$, для слоев воды $\delta_e = 0.34 \pm 0.1$.

Определенные аналогично δ_e , относительное уменьшение величины работы, совершаемой слоями воды и студня при сжатии газа, по сравнению с работой, совершаемой стабилизированным слоем — δ_A , и относительное уменьшение величин импульсов давления — δ_i составляют: для слоев студня $\delta_A = 0.22 \pm 0.13$; $\delta_i = 0.3 \pm 0.1$, для слоев воды $\delta_A = 0.39 \pm 0.15$; $\delta_i = 0.4 \pm 0.1$.

Результаты экспериментов показывают, что интенсивная теплоотдача от высоконагретого газа к диспергированному материалу слоя в зоне ТП и уменьшение эффективной толщины жидкого слоя приводят к существенному уменьшению передачи энергии к сжимаемому газу. Существенно более высокие потери в случае слоя с водой по сравнению со слоем студня можно связать с относительно более высокой степенью раздробленности воды, в студне минимальный размер частиц в зоне ТП ограничивается, хотя и малой, но конечной прочностью студня.

Совокупность приведенных параметров показывает, что турбулентное перемешивание может существенно снижать эффективность передачи энергии в цепочке: потенциальная энергия сжатого газа → кинетическая энергия жидкого слоя → внутренняя энергия сжимаемого

газа. Это снижение связано как с уменьшением эффективной массы ускоряемого слоя, так и с передачей тепла от горячего газа частицам воды в зоне турбулентного перемешивания.

Работа выполнена при поддержке ЛАНЛ США (контракт В70040006-35 ТЗ018).

Список литературы

- [1] *Забабахин Е.И.* // ЖЭТФ. 1965. Т. 49. В. 2 (8). С. 721–726.
- [2] *Жидов И.Г., Мешков Е.Е., Невмержицкий Н.В.* // ВАНТ. Сер. Теор. и прикл. физ. 1–2. 1996. С. 20–23.
- [3] *Taylor G.I.* // I. Proc. Roy. Soc. 1950. V. A201. P. 192.