

03

Развитие неустойчивости Рэлея–Тейлора на границе слоя сыпучей среды, ускоряемого сжатым газом

© М.В. Близнецов, И.Г. Жидов, Е.Е. Мешков,
Н.В. Невмержицкий, Е.Д. Сеньковский, Е.А. 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.

Описаны результаты экспериментов по ускорению слоя сыпучей среды давлением сжатого газа. В этих экспериментах слой частиц полипропилена ускорялся в канале квадратного сечения давлением сжатого газа. На неустойчивой границе слоя задавалось начальное возмущение, по форме приближающееся к синусоиде. Отсутствие прочности на разрыв (и поверхностного натяжения) приводит к тому, что на неустойчивой границе слоя не связанные друг с другом частицы на фронте выступов возмущенной границы (струи) проваливаются в газ. В области впадин возмущенной границы (пузыри), видимо, возникает уплотнение сыпучей среды и в результате прочность сыпучей среды на сжатие тормозит развитие пузырей на начальной стадии развития неустойчивости. Вследствие проникновения газа внутрь слоя происходит расширение и псевдооживление слоя.

Если граница двух сред движется с ускорением, направленным нормально границе от более легкой к более тяжелой среде, то такая граница является неустойчивой (неустойчивость Рэлея–Тейлора [1]). Во всем мире широко ведутся исследования этой неустойчивости для различных типов сред: газ–газ, газ–жидкость, жидкость–жидкость, газ–твердое тело и т.д.; представляет интерес и случай, когда одна из сред (или обе) являются сыпучей, поскольку сыпучие среды широко распространены и этот случай может иметь практическое значение.

Прочность одной из сред на неустойчивой границе раздела (или обеих сред) является стабилизирующим фактором, но в то же время она не является непреодолимым препятствием для развития неустойчивости и турбулентного перемешивания. Прочность приводит к появлению

критических значений амплитуды и длины волны начального возмущения, выше которых начальные возмущения беспрепятственно развиваются [2]. Сыпучие среды, как и обычные упругие, имеют прочность на сжатие, но не имеют никакой прочности на разрыв, отличаясь этим даже от жидкостей, имеющих поверхностное натяжение. В результате развитие неустойчивости Рэля–Тейлора на границе слоя сыпучей среды, ускоряемой сжатым газом, имеет некоторые существенные особенности.

Ниже описаны результаты одного из экспериментов по ускорению слоя сыпучей среды давлением продуктов взрыва, которые иллюстрируют эти особенности.

В этом эксперименте слой сыпучей среды ускорялся давлением продуктов взрыва (ПВ) газовой взрывчатой смеси (ГВС) ацетилена с кислородом в вертикально расположенном канале квадратного сечения с прозрачными стенками. В качестве сыпучей среды использовались частицы пропилена (с характерным размером частиц $\delta \sim 0.5 \text{ mm}$). Слой сыпучей среды из частиц полипропилена помещался на пленке лавсана толщиной $5 \mu\text{m}$, разделяющей канал сборки (сечением $4 \times 4 \text{ cm}$) на два отсека. Начальная толщина слоя $\sim 30 \text{ mm}$. На неустойчивой границе ускоряемого слоя и сжатого газа задавалось начальное двумерное возмущение, по форме приближающееся к синусоиде.

Верхний замкнутый отсек сборки (камера) заполнялся стехиометрической смесью ацетилена с кислородом. Детонация ГВС инициировалась синхронно на верхней стенке камеры в 64 точках. Нижний отсек сборки был открыт и сообщался с атмосферой.

Регистрация течения осуществлялась скоростной кинокамерой.

На рис. 1, *a* приведены кадры кинограммы опыта, в котором слой частиц полипропилена ускорялся в канале давлением ПВ ГВС.

Отсутствие прочности на разрыв (и поверхностного натяжения) приводит к тому, что с точки зрения наблюдателя, находящегося на границе слоя, не связанные друг с другом частицы на фронте выступов возмущенной границы слоя ("струи") срываются и "проваливаются" вверх с ускорением слоя — фронт струй приблизительно совпадает с первоначальным положением верхней границы слоя. В начальной стадии движения слоя плотность сорвавшихся частиц невелика — струи прозрачны.

В области впадин возмущенной границы ("пузыри") прочность сыпучей среды (на сжатие), видимо, полностью подавляет развитие пузырей. На более поздней стадии происходит распухание и, по-

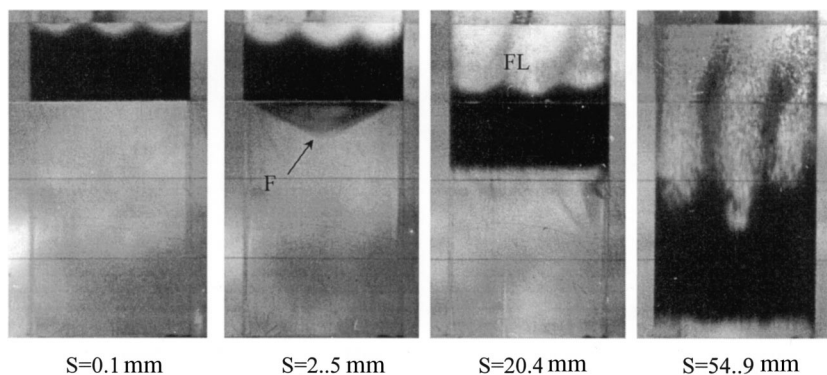


Рис. 1. Развитие $2D$ возмущения на неустойчивой границе слоя сыпучей среды — частиц полипропилена (на тонкой пленке), ускоряемого давлением сжатого газа (ПВ ГВС) в канале квадратного сечения. Обозначения: FL — слой сыпучей среды; F — пленка, удерживающая слой; S — путь, пройденный слоем (определяется по нижней устойчивой границе слоя).

видимому, псевдооживление слоя. После этого процесс развития неустойчивости становится сходным с процессом развития неустойчивости Рэлея–Тейлора на границе жидкого слоя, ускоряемого сжатым газом. В процессе развития неустойчивости существенную роль играет процесс проникновения сжатого газа в ускоряемый слой сыпучей среды. Сыпучая среда не является препятствием для проникновения ПВ ГВС внутрь слоя — это можно наблюдать по поведению пленки, на которой насыпан слой сыпучей среды. ПВ ГВС, прошедшие через слой, начинают растягивать пленку F в виде растущего пузыря ($S = 2.5$ mm, где S — путь, пройденный слоем), который позднее лопается ($S = 54.9$ mm). После этого начинается расширение сжатого газа, проникшего в слой, и вместе с ним расширение слоя.

На рис. 2, *a* приведена $S-t$ диаграмма слоя, где S — путь, пройденный слоем (определяется по нижней устойчивой границе слоя); t — время, отсчитываемое от начала движения слоя. На рис. 2, *b* приведена зависимость амплитуды возмущения неустойчивой границы слоя от пути, пройденного слоем.

В экспериментах [3], сходных по постановке с нашими, слой частиц ускоряется в канале вертикальной ударной трубы, но пленка, на которой

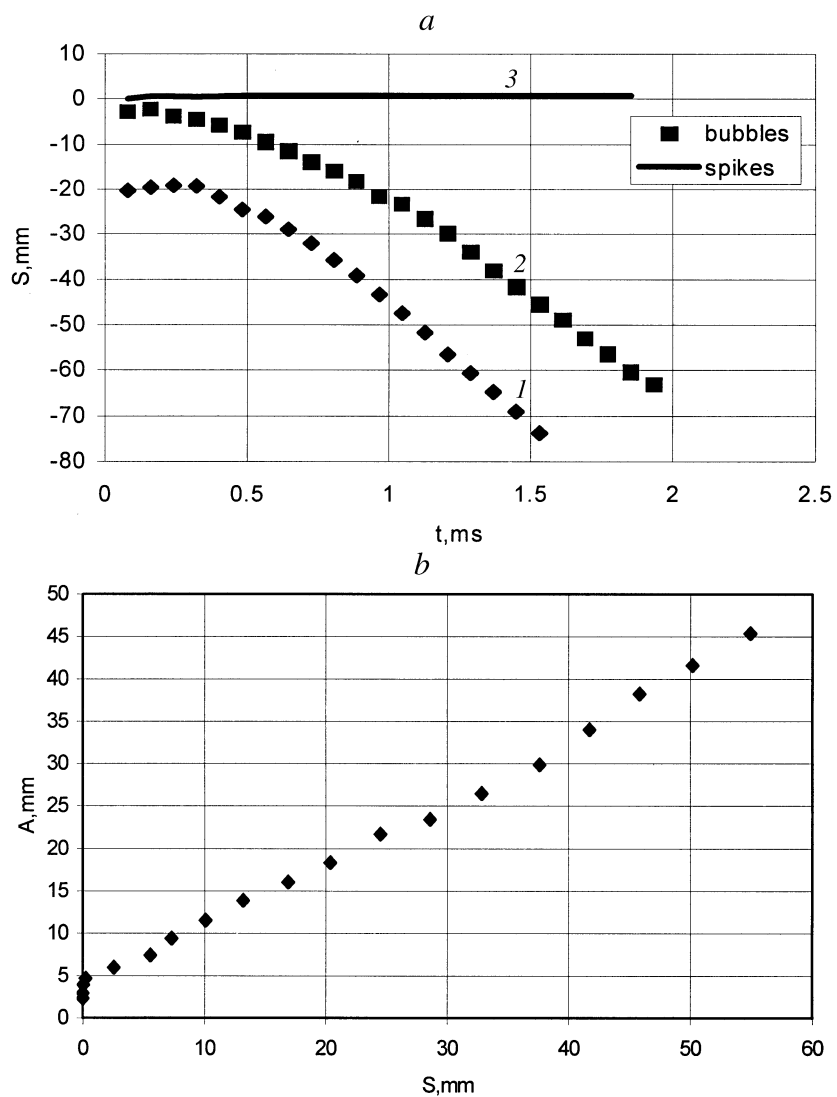


Рис. 2. *a* — S – t диаграмма движения слоя; *b* — зависимость амплитуды возмущения от пути S , пройденного слоем. Обозначения: *1* — нижняя устойчивая граница слоя; *2* — фронт пузырей; *3* — фронт струй.

удерживается слой частиц, располагается в отличие от наших экспериментов на неустойчивой границе слоя, и эта пленка может влиять на развитие неустойчивости.

Список литературы

- [1] *Taylor G.I.* // I. Proc. Roy. Soc. 1950. VA201. P. 192.
- [2] *Lebedev A.I., Nizovtsev P.N., Rayevsky V.A.* et al. // Proc. of the 5th IWPCTM. Stony Brook, USA, 1995. P. 231.
- [3] *Rogue X., Rodriguez G., Haas J.F., Saurel R.* // Shock Waves. 1998. V. 8. P. 29–45.