

03

Метание капли жидкости через мембрану продуктами газовой детонации

© Т.В. Баженова, Д.И. Бакланов, В.В. Голуб, К.В. Иванов,
М.С. Кривокорытов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
E-mail: bazhenova@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 9 октября 2012 г.

Экспериментально исследовано формирование струйки из капли жидкости, помещенной на мембрану под воздействием детонации водородовоздушной смеси в тонкой трубке. Показано, что детонационно-способная газовая смесь может заменить твердое взрывчатое вещество в устройствах для метания твердых частиц и капель жидкости, в частности для безыгольных инъекций лекарственных препаратов.

Взрывные и детонационные волны в узких трубках имеют ряд важных технических приложений. В последние годы были предложены инновационные разработки использования взрывных волн для портативных аппаратов безыгольных инъекций [1–4]. Физическая основа работы предложенных ранее устройств заключается в использовании энергии взрыва твердого взрывчатого вещества (ВВ) для ускорения микрокапсул лекарственных препаратов для введения их в эпидермис. Заряд ВВ (азид свинца) заключается в трубку, на конце которой помещается контейнер с лекарством, отделенный от трубки металлической мембраной. При взрыве ВВ мембрана прогибается, лекарство выбрасывается через отверстие в торце трубки и образует тонкую струйку. Измеренная скорость струйки составляет 100 м/с, что достаточно для осуществления безболезненной безыгольной инъекции [1]. К недостаткам подобных методик относится прежде всего необходимость использования твердого ВВ и токсичных продуктов сгорания. В данной работе предложена замена твердого ВВ в аппаратах, предназначенных для безыгольных инъекций, на водородовоздушные смеси, продуктом сгорания которых является вода, что позволит значительно расширить область применения данной методики. Для этого необходимо использовать метание

продуктами мгновенной детонации, чтобы создать такой же крутой фронт давления, как при взрыве твердого ВВ.

Создание компактного устройства для безыгольных инъекций требует, чтобы преддетонационное расстояние было как можно меньшим. В работе [5] показано, что детонация в стехиометрической водородовоздушной смеси в трубе диаметром 3 mm достигает стационарной скорости на расстоянии 154 mm от начала трубки. Этот результат достигнут за счет установления перед детонационной трубкой форкамеры большого диаметра.

Режимы газовой детонации, дающие оптимальные значения параметров для метания капель жидкости, были предварительно получены авторами в работе [5]. Исследовалась форма импульса давления при отражении детонационной волны от жесткой стенки в торце трубки при детонации смесей различного состава и при двух начальных давлениях. При начальном давлении 10^5 Pa давление за отраженной волной в водородокислородной смеси достигает $50 \cdot 10^5$ Pa и держится $6 \mu\text{s}$. В водородовоздушной смеси давление достигает $31 \cdot 10^5$ Pa и держится на протяжении $22 \mu\text{s}$. Для экспериментов по метанию капли была выбрана детонация водородовоздушной смеси при давлении 10^5 Pa, так как получаемый импульс давления выше и использование этой смеси проще, чем водородокислородной.

На основе предыдущих исследований создана экспериментальная установка, позволяющая передавать энергию нестационарной детонационной волны микрочастицам или жидкости и разгонять их до скоростей порядка 70 m/s (рис. 1). Детонация создавалась в цилиндрическом канале постоянного сечения диаметром 3 mm и длиной 370 mm, изготовленном из латунной трубки. На конце канала устанавливалась прозрачная секция длиной 36 mm, сделанная из плексигласа. Перед детонационным каналом размещена форкамера диаметром 14.5 mm и глубиной 38 mm. С помощью форкамеры увеличивается начальное энерговоложение перед входом в узкий канал. Другой причиной сокращения длины преддетонационного участка в этих опытах может служить шероховатость стенок канала, в которых располагались отверстия для фотодатчиков, регистрирующих приход фронта горения. Эксперименты при разных объемах форкамеры в работе [5] показали, что основной вклад в сокращение длины преддетонационного участка оказывает наличие форкамеры.

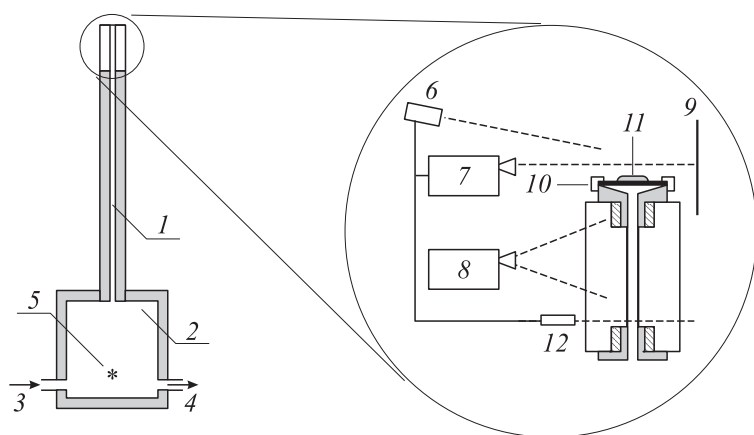


Рис. 1. Слева общий вид детонационной трубки с форкамерой: 1 — детонационная трубка длиной 405 mm с системой фотодатчиков; 2 — форкамера; 3, 4 — откачка и наполнение горючей смесью; 5 — искра. Справа схема эксперимента по съемке динамики струи жидкости: 6 — лампа-вспышка; 7 — электронно-оптическая камера; 8 — стрик-камера; 9 — экран; 10 — мембрана; 11 — капля жидкости, моделирующая лекарство; 12 — синхронизирующий фотодатчик.

Поджиг горючей смеси производился с помощью электрической искры, расположенной в форкамере. Энергия поджига не превышала $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$. Изменение скорости перемещения пламени по каналу определялось базовым методом по показаниям фотодатчиков, заделанных в стенки канала. Скорость детонации контролировалась также в прозрачной секции канала. Схема измерений в прозрачной исследовательской секции приведена на рис. 1 в увеличенном масштабе. Временная развертка процесса распространения детонации в прозрачной секции производилась с помощью стрик-камеры K008. Для измерения скорости перемещения и формы капли использовалась и электронно-оптическая камера K011 с многокадровой разверткой. Синхронизация камер производилась с помощью фотодатчика, установленного вплотную к началу прозрачной секции. При входе детонационной волны в прозрачную секцию фотодатчик регистрировал появление свечения и запускал камеры и лампу-вспышку.

4* Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 3

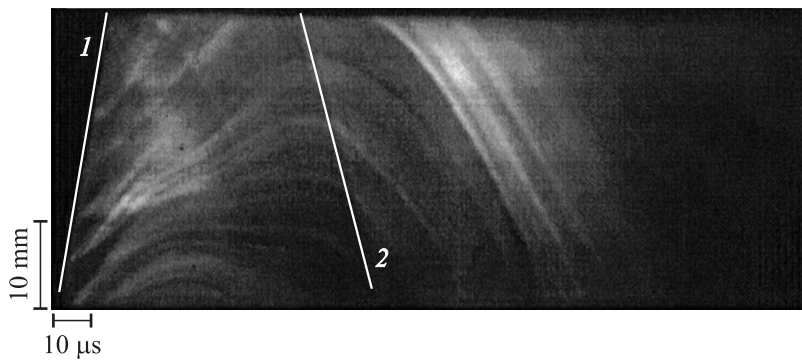


Рис. 2. Временная развертка процесса распространения детонации водородно-кислородной смеси в прозрачной секции канала. Расстояние от верхней границы прозрачной секции до мембраны 38 мм. 1 — детонационная волна; 2 — отраженная ударная волна.

На рис. 2 приведена временная развертка собственного свечения продуктов детонации при отражении детонационной волны от торца канала. На рисунке приведена развертка распространения детонации в водородокислородной смеси, так как в этом случае температура и светимость продуктов детонации больше. Временная развертка показала, что фронт горения движется с постоянной скоростью, равной 2690 м/с, которая в пределах ошибки равна скорости стационарной детонации [6]. За детонационной волной видно движение неоднородностей в продуктах горения, скорость которых по мере удаления детонационной волны уменьшается. После прихода отраженной от диафрагмы ударной волны эти неоднородности начинают двигаться вслед за ней. Передача кинетической энергии газа капле жидкости происходит при ударноволновом отражении на границе с мембраной. Изменение давления на мембране за исследованное время определяется распределением давления в отраженной волне и волнообменом. Измеренные в работе [5] значения давления на фронте отраженной волны в стехиометрической водородовоздушной смеси составляют $31 \cdot 10^5$ Па. Эти значения совпадают с расчетными давлениями, основанными на известных параметрах для стационарной детонации [6].

Для исследования динамики ускорения капли жидкости под действием детонационной волны в противоположном от форкамеры торце канала устанавливался исследовательский блок, замыкаемый тонкой деформируемой мембраной. Для большей площади контакта диафрагмы с горючей смесью канал имеет расширение непосредственно перед мембраной, диаметр которой составлял 20 мм. Капля жидкости наносилась на мембрану медицинским шприцем, она состояла из подкрашенной чернилами воды, имела массу 0.2 г и растекалась по поверхности в круг диаметром 4–5 мм. При прогибе мембраны под воздействием продуктов детонации капля отрывалась от нее.

Для определения зависимости скорости метания капли от характеристик мембраны в блоке устанавливались мембраны различных толщин, изготовленные из различных материалов. Мембраны изготавливались из стали толщиной 0.1 и 0.08 мм и меди толщиной 0.14 и 0.08 мм. Мембраны были жестко заделаны по окружности диаметром 15 мм. После экспериментов наблюдалась деформация мембраны (прогиб в центре на 1–1.5 мм). Мембрана из меди, модуль упругости которой в 2 раза меньше, чем у стали, прогибается больше.

На рис. 3 приведены фотографии капли, полученные для различных моментов времени после начала деформации мембраны из стали толщиной 0.08 мм под воздействием детонации стехиометрической водородовоздушной смеси.

На фотографиях видно, что при воздействии детонационной волны на мембрану капля принимает вид струйки, так как при истечении потока из трубки в расширение (рис. 1) центральная часть движется быстрее и передает большой импульс находящейся на ней жидкости. Полный отрыв капли за исследуемый промежуток времени наблюдался только при воздействии на тонкую медную мембрану.

На основе фотографий капли для различных моментов времени получены траектории переднего края струйки жидкости при воздействии детонационной волны в водородовоздушной смеси на мембраны из стали и меди различной толщины.

Пример полученной траектории для серии, представленной на рис. 3:

$t, \mu s$	10	70	130	190	250	310	410
x, mm	4.4	6.7	10.9	15.3	19.4	22.9	29.4

Скорость перемещения переднего края струйки, полученная дифференцированием траектории $x(t)$, меняется со временем. Скорость быстро

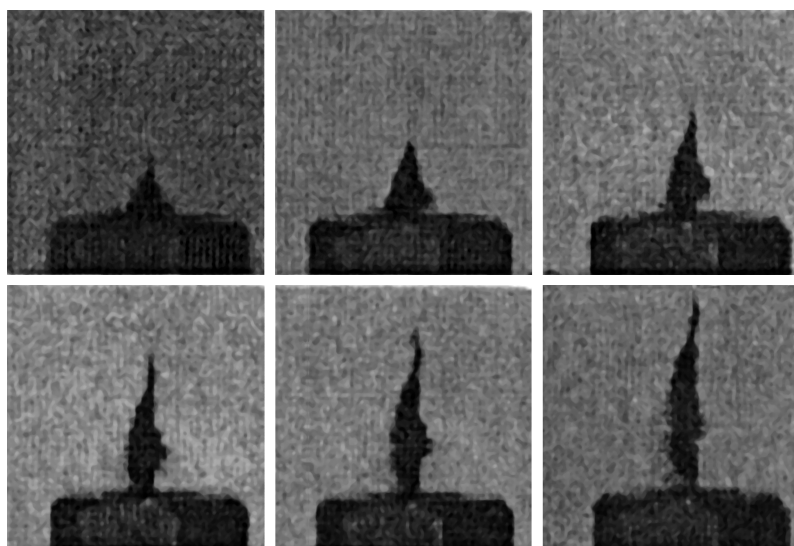


Рис. 3. Покадровая съемка струи. Кадры расположены слева направо. Межкадровая пауза $40 \mu\text{s}$; время стояния кадра $1 \mu\text{s}$; высота струйки на третьем кадре 15 mm .

Мембрана	Максимальная скорость струи, m/s	Расстояние от мембраны x , mm	Время t_m , μs
Стальная			
0.10 mm	67.5	4	80
0.08 mm	72.5	12.5	120
Медная			
0.14 mm	28	3.5	160
0.08 mm	65	13	200

достигает максимума, за которым следует более плавное уменьшение скорости. При этом капля продолжает иметь вид струйки. Время достижения максимальной скорости t_m зависит от толщины и материала мембраны. Результаты измерений приведены в таблице.

Из представленных в таблице результатов видно, что чем тоньше мембрана, тем больше максимальная скорость, время достижения этой

скорости и расстояние переднего края струи от мембраны в этот момент больше. С увеличением массы стальной мембраны на 20% максимальная скорость достигается на 50% быстрее. Аналогичная зависимость прослеживается и для медной мембраны. При одной и той же толщине стальная мембрана создает струйку с большей скоростью за более короткое время.

Проведенное исследование показало, что при воздействии детонационной волны на каплю жидкости, расположенную на стальной мембране в торце детонационной трубки, капля образует струйку, скорость переднего края которой достигает более 70 м/с. Полученный результат открывает перспективу создания аппарата для безыгольных инъекций лекарственных препаратов без использования твердых взрывчатых веществ.

Работа выполняется при частичной поддержке Минобрнауки (№ 11.519.11.3003 от 18.08.2011 и № 16.518.11.7007 от 12.05.2011) и РФФИ (проект 10 08 00214).

Список литературы

- [1] Jagadees G. et al. // Book of Proceedings of The 27th International Symposium on Shock Waves. Sanct Peterburg, Russia. July 19–24. 2009. Paper 3026. P. 417.
- [2] Патент Indian Application 260/CHE/2009, 256/CHE/2009.
- [3] Патент US Patent Application No. 12480514.
- [4] Патент US Patent Application No. 12480508.
- [5] Бакланов Д.И., Голуб В.В., Иванов К.В. и др. // ТВТ. 2012. Т. 50. № 2. С. 258–263.
- [6] Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород: параметры горения и взрыва. М.: Физматлит, 2008. С. 187, 190.