

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 533.6.011

А.Л. Котельников, Т.В. Баженова, Д.И. Бакланов, В.В. Голуб, К.В. Иванов,  
М.С. Кривокорытов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт  
высоких температур Российской академии наук, Россия, 125412, Москва, Ижорская ул.,  
13 стр.2, E-mail: bazhenova@ihed.ras.ru*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ФОТОГРАФИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СТРУЙКИ ЖИДКОСТИ ПРИ БЕЗЫГОЛЬНОЙ ИНЪЕКЦИИ**

### **АННОТАЦИЯ**

Методом высокоскоростной фотографии исследовано формирование струйки из капли жидкости, помещенной на мембрану, под воздействием детонации водородно-воздушной смеси в тонкой трубке. Найдены условия, при которых скорость струйки достигает таких значений, которые необходимы для проникновения жидкости в эпидермис и измерена глубина ее проникновения в модельную среду. Проведенные исследования показали, что газовая детонация в капилляре может заменить твердое ВВ в устройствах для метания капель жидкости, в частности, для безыгольных инъекций лекарственных препаратов.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Оптическим методом проведены исследования возможности создания высокоскоростной струйки для безыгольного инъектора, посредством которого доза лекарственного средства разгоняется до скорости, достаточной для пробивания кожного покрова человека, растения или животного, проходящего курс лечения, в результате чего лекарственное средство вводится в ткани объекта. Это достигается тем, что в качестве толкателя для лекарственного препарата используется детонация твердого ВВ [1] газовой смеси водорода с кислородом либо воздухом при повышенном начальном давлении, при этом детонационная волна действует на лекарственный препарат через упругую промежуточную мембрану. Струйка препарата под очень высоким давлением проникает через кожный покров. Такие инъекторы обладают рядом преимуществ: так как отверстие от струи меньше, чем от иглы, пациент испытывает меньшую боль, чем при подкожных вливаниях, осуществляемых инъекторами игольного типа; количество лекарственного средства, попадающего в капилляры, часто повышается, поскольку распределение лекарственного средства в тканях тела является более широким, чем достигаемое с помощью игольного инъектора, который вносит лекарственное средство в виде шарика у кончика иглы; меньше вероятность заражения другого пациента; легче делать инъекцию животным, со стороны которых часто отсутствует сотрудничество, поскольку отсутствует риск поломки или изгиба иглы, а инъекция осуществляется быстрее, чем игольным инъектором; отсутствует проблема утилизации игл; уменьшен риск так называемой колотой травмы.

Использование газовой детонации вместо взрыва твердого ВВ позволит повысить безопасность и снизить стоимость, износ и негативное влияние на окружающую среду.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Устройство для создания струйки жидкости (рис. 1) состоит из исполнительного блока, включающего в себя газовый генератор 1, детонационную камеру 3 и узел инициирования детонации 2, и устройства для дозировки препарата 5, отделенного от камеры сгорания упругой мембраной 4.

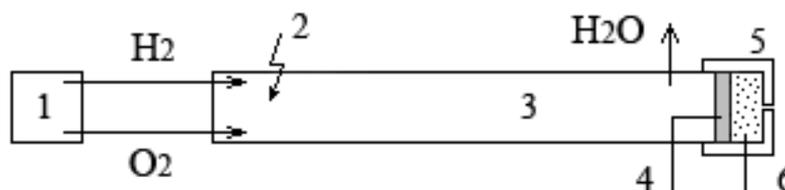


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для создания струйки лекарственного препарата

Детонационная камера 3 наполняется водородом и кислородом либо воздухом до необходимого давления с помощью газового генератора 1. Узел инициирования детонации 2 создает детонационную волну в горючей смеси, заполняющей детонационную камеру. Детонационная волна толкает упругую мембрану 4. Мембрана ускоряет навеску препарата 6, которая проходит через устройство дозировки 5, приобретая необходимые параметры. Пары воды, образовавшиеся в процессе детонации, выпускаются через выхлопное отверстие. Устройство дозировки 5 снова наполняется необходимым количеством препарата.

Создание компактного устройства для безыгольных инъекций требует, чтобы преддетонационное расстояние было как можно меньшим. В работах [2, 3] показана возможность получения детонации в водородо-кислородной или метано-кислородной смеси при атмосферном давлении в трубках диаметром 3 мм на расстоянии 120-150 калибров. Этот результат достигнут за счет установления перед детонационной трубкой форкамеры большего диаметра (Рис. 2). С помощью форкамеры увеличивается начальное энерговложение перед входом в узкий канал.

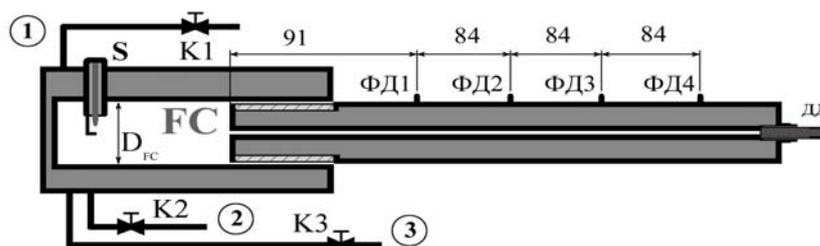


Рис. 2. Схема форкамеры и детонационного канала: S – свеча; FC – форкамера, D<sub>fc</sub> – Диаметр форкамеры 16 мм; ФД1, ФД2, ФД3, ФД4 – фотодатчики; ДД – датчик давления.

Детонация создавалась в цилиндрическом канале постоянного сечения диаметром 3 мм и длиной 370 мм, изготовленном из латунной трубки. На конце канала устанавливалась прозрачная секция длиной 36 мм, сделанная из плексигласа. Перед детонационным каналом размещена форкамера диаметром 14,5 мм и глубиной 38 мм. Поджиг горючей смеси производился с помощью электрической искры, расположенной в форкамере. Энергия поджига не превышала 0.1 Nm. В опытах использовалась стехиометрическая смесь водорода с воздухом при начальном давлении 1 атм.

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

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 размещения оптической аппаратуры приведена на рис. 3.

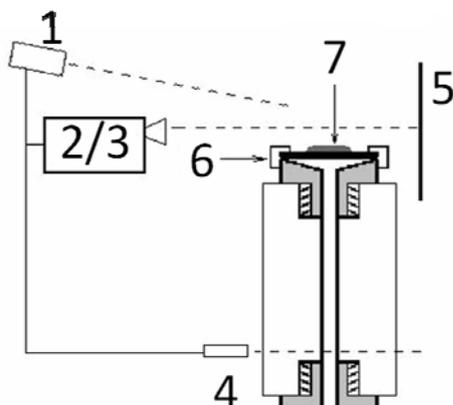


Рис. 3. Схема эксперимента по съемке динамики струи жидкости. 1– лампа-вспышка; 2– электронно-оптическая камера; 3– стрик-камера; 4– синхронизирующий фотодатчик; 5 – экран; 6 – диафрагма; 7 – капля жидкости, моделирующая лекарство

Временная развертка процесса распространения детонации в прозрачной секции производилась с помощью стрик-камеры К008. Для измерения скорости перемещения и формы капли использовались и электронно-оптическая камера К011 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.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### Визуализация процесса отражения детонационной волны от торца трубки

На рис. 4 приведена временная развертка собственного свечения продуктов детонации при отражении детонационной волны от торца канала. На рисунке приведена развертка распространения детонации в водородо-кислородной 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. 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 ударно-волновом отражении на границе с мембраной.

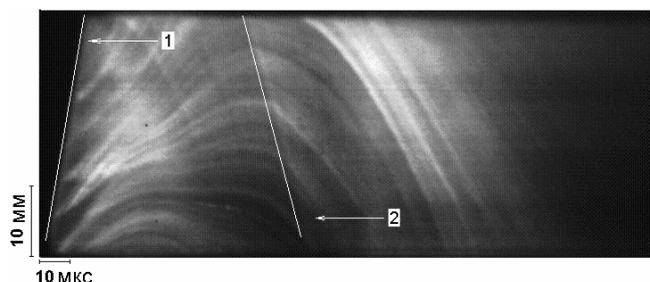


Рис. 4. Временная развертка процесса распространения детонации в канале. Расстояние от верхней границы прозрачной секции до диафрагмы – 38 мм. 1 – детонационная волна; 2 – отраженная ударная волна

Измеренные в работе [1] значения давления на фронте отраженной волны в стехиометрической водородо-воздушной смеси составляет  $31 \cdot 10^5$  Па. Эти значения совпадают с расчетными давлениями, основанными на известных параметрах для стационарной детонации [3].

### Измерение скорости струйки жидкости под воздействием газовой детонации

При прогибе мембраны под воздействием продуктов детонации капля приходила в движение. 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 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). Прогиб стальной мембраны был меньше, что допускало ее повторное использование

На рис. 5 приведены фотографии капли, полученные для различных моментов времени после начала деформации мембраны из стали толщиной 0.08 мм под воздействием детонации стехиометрической водородо-воздушной смеси.

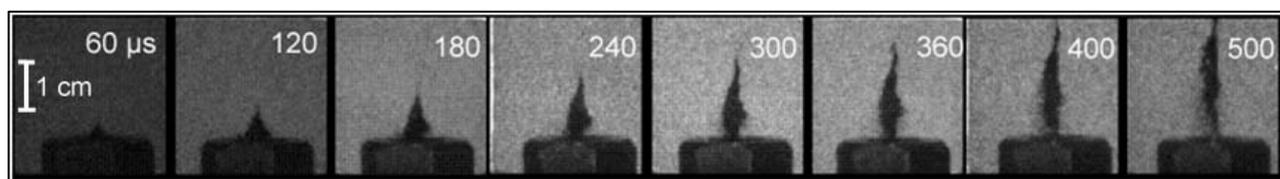


Рис. 5. Покадровая съемка струи. Время стояния кадра - 1 мкс. В эксперименте использовалась стальная диафрагма толщиной 0.08 мм

На фотографиях видно, что при воздействии детонационной волны на мембрану капля принимает вид струйки, так как при истечении потока из трубки в расширение центральная часть движется быстрее и передает больший 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 водородо-воздушной смеси на мембраны из стали и меди различной толщины. (Рис. 6 и 7)

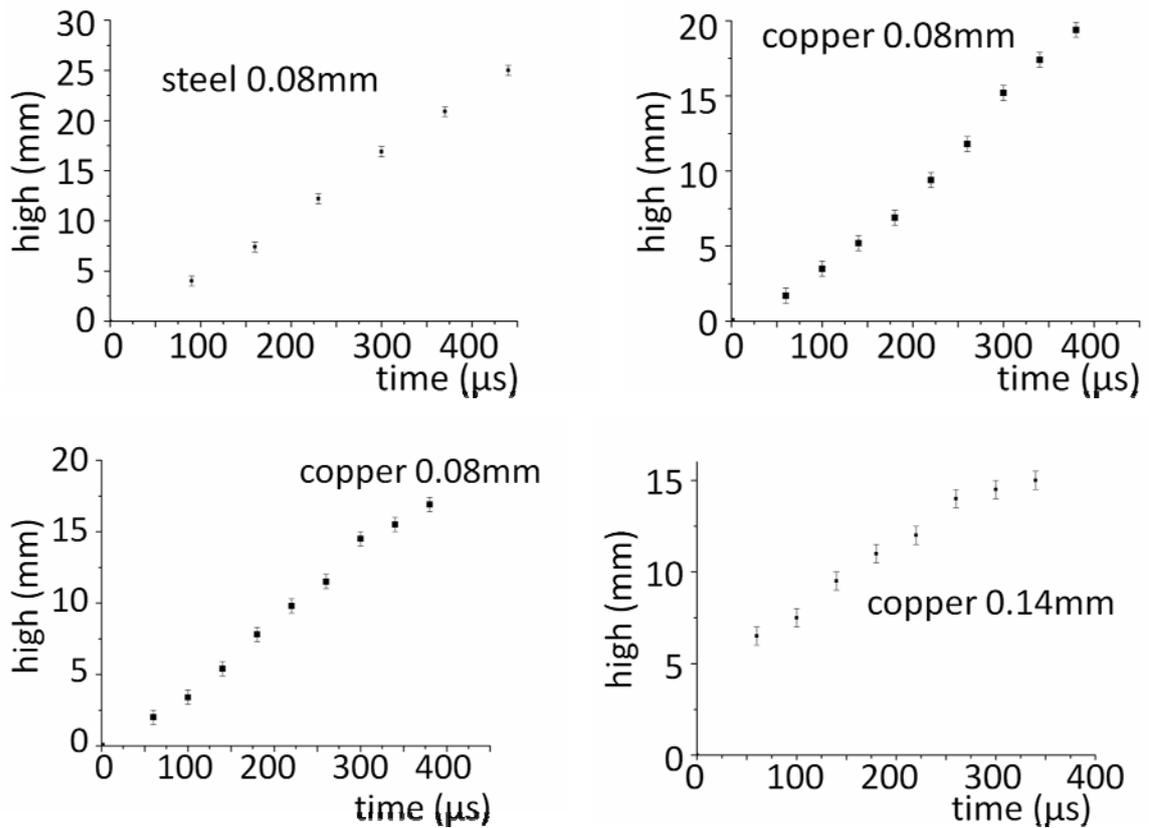


Рис. 6. Траектории переднего края струйки из стали и меди различной толщины

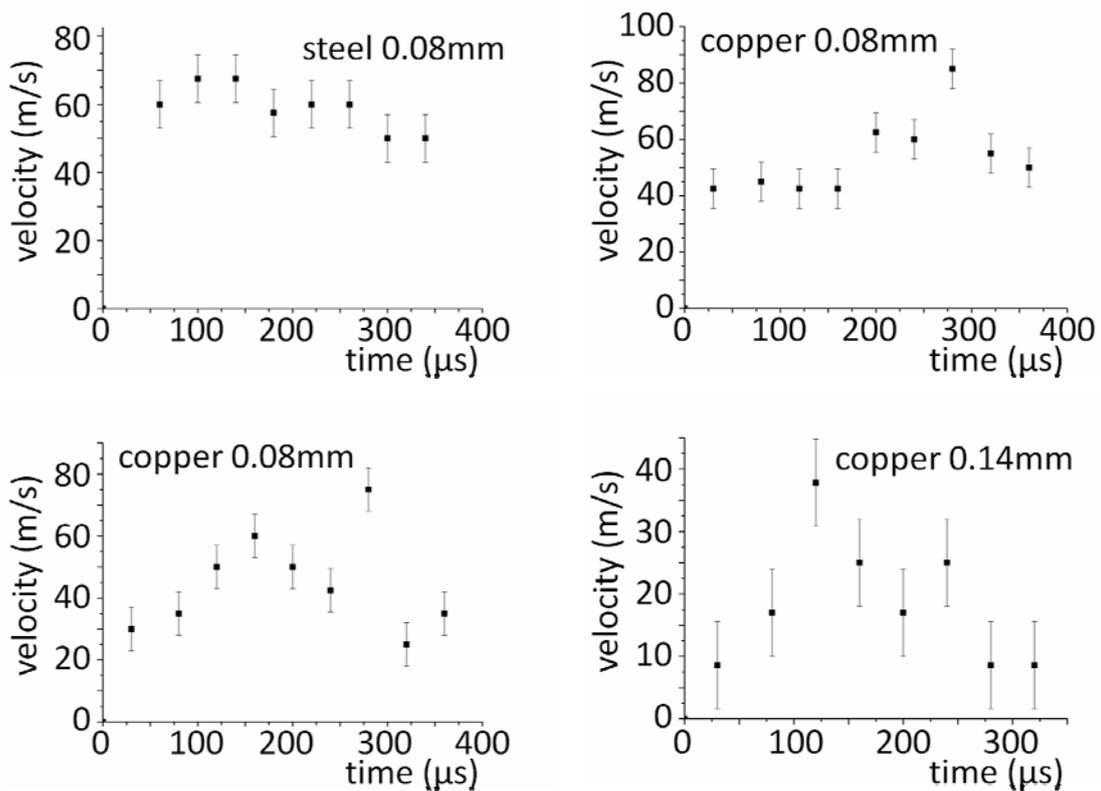


Рис. 7. Скорости переднего края струйки из стали и меди различной толщины

Скорость перемещения переднего края струйки, полученная дифференцированием траектории  $x(t)$ , меняется со временем. При этом капля продолжает иметь вид струйки. Время достижения максимальной скорости  $t_m$ , зависит от толщины и материала мембраны. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Мембрана	Максимальная скорость струи, м/с	Расстояние от Мембраны $x$ , мм	Время $t_m$ мкс
Стальная, 0.10 mm	67,5	4	80
Стальная, 0.08 mm	72,5	12,5	160
Медная, 0.14 mm	28	3,5	120
Медная, 0.08 mm	65	13	250

При использовании стальных мембран струя быстро приобретает максимальную скорость: при толщине мембраны 0.1 мм через 80 мкс; при толщине 0.08 мм через 120 мкс. При использовании медных мембран максимальную скорость струя приобретает за более длительный промежуток времени: при толщине мембраны 0.08 мм через 200 мкс, а при толщине 0.14 мм через 160 мкс. При одной и той же толщине, (0.08 мм) стальная мембрана оказалась более эффективной, чем медная. Максимальная скорость составила 72.5 м/с для стальной мембраны, в то время как для медной только 65 м/с, при этом время достижения максимальной скорости почти в два раза меньше для стальной мембраны.

### Проникновение препарата в модельные среды

В качестве сред, моделирующих эпидермис, использовались агорозный гель и кусок сала. [4]. Опыты проводились со стальной мембраной толщиной 0.08 мм, которая обеспечивает наиболее быстрое достижение скорости и наибольшую максимальную скорость. Струя формировалась с помощью модифицированного диафрагменного блока (рис.8), в котором жидкость под действием деформирующейся диафрагмы выбрасывалась через тонкое отверстие диаметром 0,1 мм, на расстоянии нескольких миллиметров от которого находился образец агорозного геля.

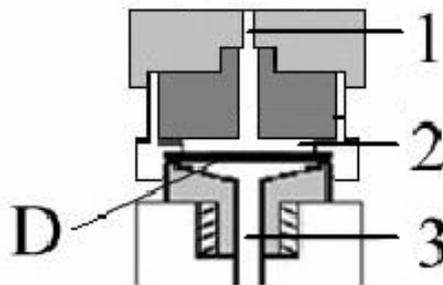


Рис. 8. Схема блока инъектирования; D – диафрагма, 1 – канал, формирующий струю, 2 – препарат, 3 – детонационный канал

На рис. 9 приведена фотография проникновения струйки жидкости в агорозный гель. Глубина проникновения составила 15 мм. При использовании в качестве модельной среды сала глубина проникновения не превышала 5 мм.

Полученные результаты демонстрируют возможность применения детонации водородных смесей в устройствах для безыгольных инъекций.

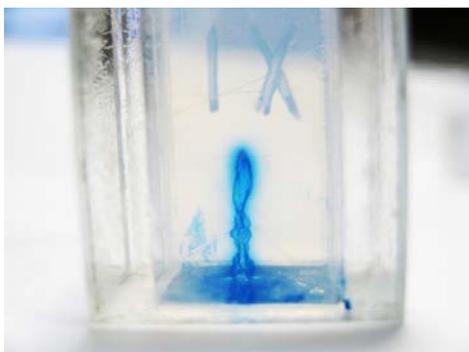


Рис. 9. Проникновение струйки подкрашенной жидкости в агарозный гель.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдаемое различие динамики полета струи, объясняется различными свойствами мембран, а именно жесткостью, которая при одинаковых толщине и условиях крепления определяется модулем упругости материала. Мембрана, из меди, имеющей в два раза меньший модуль упругости, чем у стали, больше подвергается изгибу. Расход энергии на изгиб уменьшает долю энергии, передаваемой капле от продуктов детонации. При одних и тех же размерах процесс необратимой деформации для медной мембраны начинается при меньших нагрузках, чем для стальной. При этом энергия деформации, обратно пропорциональная жесткости, для медной мембраны больше, чем для стальной, следовательно, при использовании меди в качестве материала для мембран меньшее количество энергии переходит в кинетическую энергию капель. Наилучшие показатели получены для стальной мембраны толщиной 0.08 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Газовая детонация в капилляре может заменить твердое ВВ в устройствах для метания капель жидкости,

Работа выполнена 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.** From Micro-Explosions to Drug Delivery: Emerging Paradigms of Shock Wave Research // Book of Proceedings of The 27<sup>th</sup> International Symposium on Shock Waves. Saint-Petersburg, Russia. July 19-24. 2009. Paper 3026. P. 417
2. **Бакланов Д.И., Голуб В.В., Иванов К.В., Кривокорытов М.С.** Переход горения в детонацию в канале диаметром меньше критического диаметра существования стационарной детонации. //ТВТ. 2012. Т. 50 №. 2. С. 258-263
3. **Иванов К.В., Бакланов Д.И., Голуб В.В., Головастов С.В., Баженова Т.В., Котельников А.Л.** Переход горения в детонацию в метано-кислородной смеси в узком канале //Известия КБГУ. Нальчик: Наука. 2013.
4. **Голуб В.В., Баженова Т.В., Бакланов Д.И., Иванов К.В., Кривокорытов М.С.** Применение детонации водородных смесей в устройствах для безыгольных инъекций. ТВТ 2013. Т. 51. № 1

A.L. Kotelnikov, T.V. Bazhenova, D.I. Baklanov, V.V. Golub, K.V. Ivanov, M.S. Krivokoritov

*Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Russia, 125412, Moscow,  
Izhorskaya st., 13 Bld. 2, E-mail: bazhenova@ihed.ras.ru*

**APPLICATION OF HIGH-SPEED PHOTOGRAPHY FOR VELOCITY  
MEASUREMENT OF FLUID JET AT NEEDLELESS INJECTION**

*It was observed by means of high-speed photography the formation of a jet from the liquid droplet placed on a membrane under the impact of detonation of hydrogen-air mixture in a narrow tube. There were found the conditions, under which the jet velocity achieves the value that enable penetrating the liquid into the epidermis and it was measured the depth of penetration into a model matter. The performed investigations showed that the gas detonation in a capillary can substitute the solid explosive in various devices of droplets acceleration in particular for needleless injection devices.*