

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ КАПЛИ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ПО СРЫВНЫМ МЕХАНИЗМАМ

В.М. Бойко, С.В. Поплавский

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

PHYSICAL MODEL OF DROP BREAKUP BEHIND SHOCK WAVE AT THE STRIPPING MODES

V. M. Boiko, S. V. Poplavski

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk

The results of experimental study of the drop breakup in incident shock wave are presented. Two known mechanisms of the stripping drop breakup in shock wave have been considered: 1) – breaking up by way of “stripping” of liquid boundary layer from the drop equator (sheet stripping) and 2) – stripping of micro drops from the crests of wave perturbation generated on windward surface because of evolution of Kelvin-Helmholtz instability (wave crest stripping). The analysis of the experimental data permitted to formulate the physical model of drop interaction with incident shock wave and deduce criterion of change of the stripping modes of drop dispersion in shock wave.

Введение

Динамика капель в потоке за проходящей ударной волной это важная фундаментальная задача физической газодинамики, в рамках проблемы распространения ударных волн в многофазных средах [1,2]. Актуальность ее продиктована целым рядом таких наукоемких приложений, как пожаро- и взрывобезопасность углеводородных аэрозолей, приготовление топливных смесей в авиационном и ракетном двигателестроении, дождевая капельная эрозия деталей планера и двигателей высокоскоростных летательных аппаратов и т.д.

К настоящему времени опубликовано большое число работ по аэродинамическому дроблению капель, отраженных в ряде обзоров (см., например, [3-7]). Отмечается [4], что законченная модель аэродинамического дробления капель жидкости до сих пор не создана. Все имеющиеся представления о закономерностях дробления и определяющих параметрах получены из эксперимента, а наиболее исследованным является разрушение капель в ударных волнах. Основными параметрами процесса являются числа Вебера $We = \rho d(u-V)^2/\sigma$, Лапласа $Lp = \rho_l \sigma d^2/\mu_l$ (или Онезорге $Oh = Lp^{-0.5}$), Бонда $Bo = \rho_l g d^2/\sigma$ и Струхаля $Sh = u\Delta t/d$. Считается, что из числа определяющих параметров наибольшее влияние на режим дробления оказывает число Вебера. Известно несколько классификаций режимов дробления по числу Вебера, выделяющих шесть [3,6] или пять [4,5] основных механизмов. Наиболее отвечающей современным представлениям, по-видимому, следует признать классификацию из [6] для капель маловязких жидкостей. Она несколько отличается от предыдущих как по типам разрушения, так и по критическим значениям $We_{кр}$:

1. вибрационное дробление (vibrational breakup) $We = 8 \div 12$;
2. дробление по типу "парашют" (bag breakup) $12 < We < 50$;
3. дробление по типу "парашют" со стружкой (bag-and-stamen breakup) $50 < We < 100$;
4. срыв пограничного слоя жидкости с экватора капли (sheet stripping) $100 < We < 350$;
5. срыв микрокапель с гребешков волн, возникающих на наветренной поверхности капли, (wave crest stripping) $We > 350$;
6. катастрофическое дробление (catastrophic breakup) $We > 350$.

В частности, в отличие от предыдущих, эта классификация выделяет два срывных механизма, которые, в основном, реализуются и отчетливо различаются в ударных волнах. Однако последние исследования показали, что критические числа $We_{кр}$ смены срывных механизмов нуждаются в существенных уточнениях.

Известны две основные точки зрения на механизмы срывного разрушения. Согласно первой основная роль в разрушении капли принадлежит образованию под действием сил трения пограничного слоя в жидкости и последующему его срыву. Толщина δ погранслоя

возрастает от нуля в точке торможения до максимума δ_{\max} на экваторе, за которым градиент давления становится отрицательным и рост прекращается. С экватора капли срывается пленка жидкости и дробится потоком газа. Средние размеры образующихся микрочастиц d_l оцениваются величиной порядка толщины пограничного слоя жидкости в экваториальной части капли, а время индукции срыва соответствует времени его формирования [7]:

$$d_l \approx \delta_{\max} = 2.43d_0(\mu_l/\mu)^{1/2}(\rho_l/\rho)^{1/4}\text{Re}^{-1/2} \quad (1)$$

$$t_i \approx 0.37t_0 = 0.37(d_0/u)(\rho_l/\rho)^{1/2} \quad (2)$$

где μ_l, μ - вязкости жидкости и газа, ρ_l, ρ - плотности жидкости и газа, d_0 – начальный размер капли, u – скорость газа, σ - коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Согласно второй точки зрения, впервые высказанной в [8], основная роль в срывном разрушении капли принадлежит механизму развития гидродинамической неустойчивости. Под действием потока газа на поверхности жидкости из-за развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца появляются возмущения, амплитуда которых нарастает настолько, что силы поверхностного натяжения не могут преодолеть действия аэродинамических сил. С гребней возмущений начинается отрыв микрокапель, размеры которых d_l оцениваются величиной пропорциональной средней длине волны λ_s этих возмущений, а время индукции срыва - характерным временем развития неустойчивости [9]:

$$d_l = A\lambda_s, \quad \lambda_s = 9\pi\mu_l^{2/3}\sigma^{1/3}\rho_l^{-1/3}(\rho u^2/2)^{-2/3} \quad (3)$$

$$t_i = B \cdot \mu_l^{1/3} \sigma^{2/3} \rho_l^{1/3} (\rho u^2/2)^{-4/3} \quad (4)$$

где A и B – коэффициенты пропорциональности, определяемые из эксперимента.

Эксперименты по регистрации задержки разрушения капель и анализ данных

Для выявления условий смены срывных механизмов разрушения были выполнены серии опытов с каплями различных жидкостей, отличающихся по физическим параметрам (вода, спирт, ацетон, гексан, тридекан). Эксперименты проведены на установке, описанной в работе [10]. Эксперименты выполнялись по двум направлениям:

- эксперименты с каплями в ударных волнах с регистрацией многокадровым теневым методом на основе лазерного стробоскопа в качестве источника света: эти эксперименты дали ряд новых важных наблюдений о поведении капли, количественные данные о периоде индукции разрушения и позволили получить критерий смены срывных режимов диспергирования капель в ударных волнах.

- эксперименты с твердой моделью капли в стационарных потоках с регистрацией поля течения методом PIV: сравнение теневых изображений капли с полем внешнего течения, а также анализ данных по задержкам разрушения капель позволили сформулировать физическую модель взаимодействия капли с проходящей ударной волной.

На рис. 1 приведены типичные серии теневых изображений деформации и разрушения капель, иллюстрирующих: *а* - дробление за счет “обдирки” пограничного слоя жидкости с капли при $We = 400$ (четвертый тип дробления по классификации [6]) и *б* - дробление за счет срыва микрочастиц с гребней волновых возмущений, образующихся на наветренной поверхности капли при $We = 2000$ (пятый тип дробления по классификации [6]).

Видно, что в данных экспериментах время индукции срыва микрочастиц t_i надежно измеряется и может использоваться для сравнения с рассчитанным по двум моделям. По теневым снимкам получены данные по t_i в широком диапазоне параметров ударных волн для пяти исследованных жидкостей. Далее они анализируются на примере капель воды. Простое сопоставление выражений (2) и (4) для t_i показывает, что они существенно отличаются по характеру зависимости от ряда определяющих параметров ($d_0, \mu_l, \mu, \rho_l, \rho$ и т.д.) и могут быть подвержены количественной проверке. Результаты измерения t_i для капель воды в зависимости от скорости потока за фронтом ударной волны приведены на рис. 2. Здесь же

представлены расчетные зависимости $t_i(U)$. Цифра 1 соответствует выражению (2), цифра 2 - выражению (4).

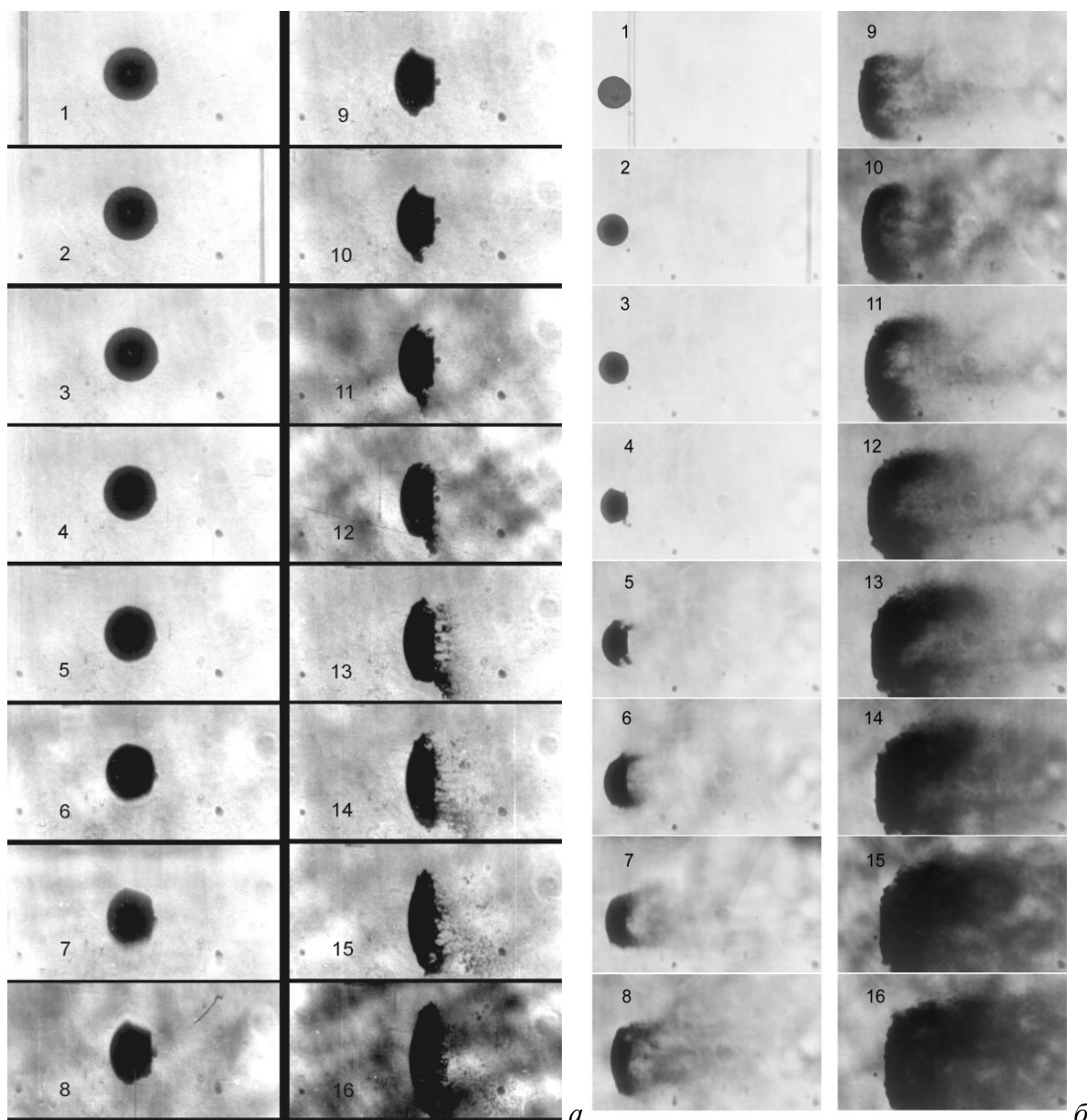


Рис.1. Типичные серии теневых изображений, поведения каплей в срывных режимах: *а* – срыв пограничного слоя жидкости (капля воды, $d = 2.75$ мм, $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $u = 78$ м/с, $We = 400$, $Oh = 2,2 \cdot 10^{-3}$), *б* – срыв жидкости с гребней волн неустойчивости (капля тридекана, $d = 2.2$ мм, $\sigma = 26 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $u = 118$ м/с, $We = 2000$, $Oh = 9,5 \cdot 10^{-3}$)

В зависимости от интенсивности УВ и физических свойств жидкости срывное разрушение капли реализуется либо по механизму “обдирки” пограничного слоя жидкости, либо по механизму развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Преобладающее воздействие одного или другого механизмов определяется меньшим из их времени развития:

$$0.37(d_0/u)(\rho_l/\rho)^{1/2} \geq 480 \cdot \mu_1^{1/3} \sigma^{2/3} \rho^{1/3} (\rho u^2/2)^{-4/3} \quad (5)$$

Преобразовав (5) с учетом чисел Вебера $We = \rho u^2 d/\sigma$ и Онезорге $Oh = \mu_l/(\rho_l d \sigma)^{0.5}$, получим условие перехода от механизма “обдирки” к механизму неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в критериальном виде:

$$We \geq 1,65 \cdot 10^4 \cdot Oh^{0,4} \quad (6)$$

В качестве примера приведем полученные по соотношению (6) характерные значения критического числа Вебера, соответствующего переходу к механизму разрушения из-за неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, которые составляют: для воды - $We_{кр} = 1440$, для гексана - $We_{кр} = 1350$. Для сравнения соответствующее значение критического числа Вебера, приведенное в работе [6], составляет $We_{кр} = 350$.

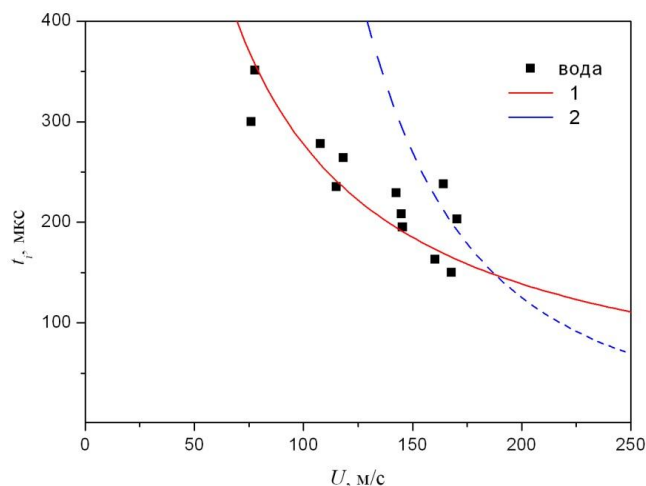


Рис.2. Время индукции разрушения капли воды в зависимости от скорости потока за фронтом ударной волны; значки – эксперимент, 1 - расчет по выражению (2), 2 - расчет по выражению (4).

Эксперименты по обтеканию модели капли

Для детализации взаимодействия капли с потоком за ударной волной диапазон чисел Вебера $200 \leq We \leq 9400$ моделировался в слабых ударных волнах с числом Маха $1.1 \leq Ms \leq 1.4$. Растяжение во времени периода индукции разрушения кроме количественных данных по задержкам дало ряд новых важных наблюдений качественного характера по деформации и особенностям разрушению капли, а именно. Вблизи сферической капли устанавливается течение газа (при данных числах $Re \geq 10^3$ - отрывное) с характерным неоднородным распределением давления по поверхности. Под действием динамического напора капля испытывает ускорение $\sim 10^4$ м/с², а также деформацию с характерной скоростью внутреннего течения жидкости до 20 м/с и ускорением $\sim 10^5$ м/с². Под наветренной поверхностью капли формируется сопряженный погранслои, что также способствует внутреннему перемещению жидкости к мидельному сечению. В купе с понижением внешнего давления в области отрыва потока это приводит к росту миделя и образованию первой острой кольцевой кромки на контуре капли (излом образующей, см. рис.1, а, кадры 7-8; рис.1, б, кадр 4). У донной поверхности капли к этому моменту также наблюдается острая кольцевая кромка. Эти особенности формы капли могли бы представлять чисто академический интерес, если бы не были выраженными зонами массоуноса по первому срывному механизму. Формирование второго излома образующей вблизи донной поверхности капли становится более понятным при анализе поля течения газа вблизи и в аэродинамическом следе капли.

В части исследования структуры газового потока вблизи капли проведены эксперименты в стационарных потоках на режимах близких к ударноволновым условиям по числам Маха, Рейнольдса и Вебера. Форма моделей соответствует той, что наблюдалась в предварительных экспериментах с жидкими каплями. Регистрация поля течения выполнялась в плоскости симметрии модели двумерной схемой PIV с использованием комплекса фирмы "Oxford Lasers". Эксперименты выполнялись в калибровочной аэродинамической трубе фирмы "DISA", доработанной для ввода светового «ножа» и для «запыления» потока трассирующими частицами. Трассирующие частицы получали с помощью коммерческого источника тумана «Martin magnum 550» (размер частиц 0.2-

60 мкм). На рис.3 показана серия кадров, регистрирующая поле скорости газа вблизи и в следе модели капли с двумя изломами образующей.

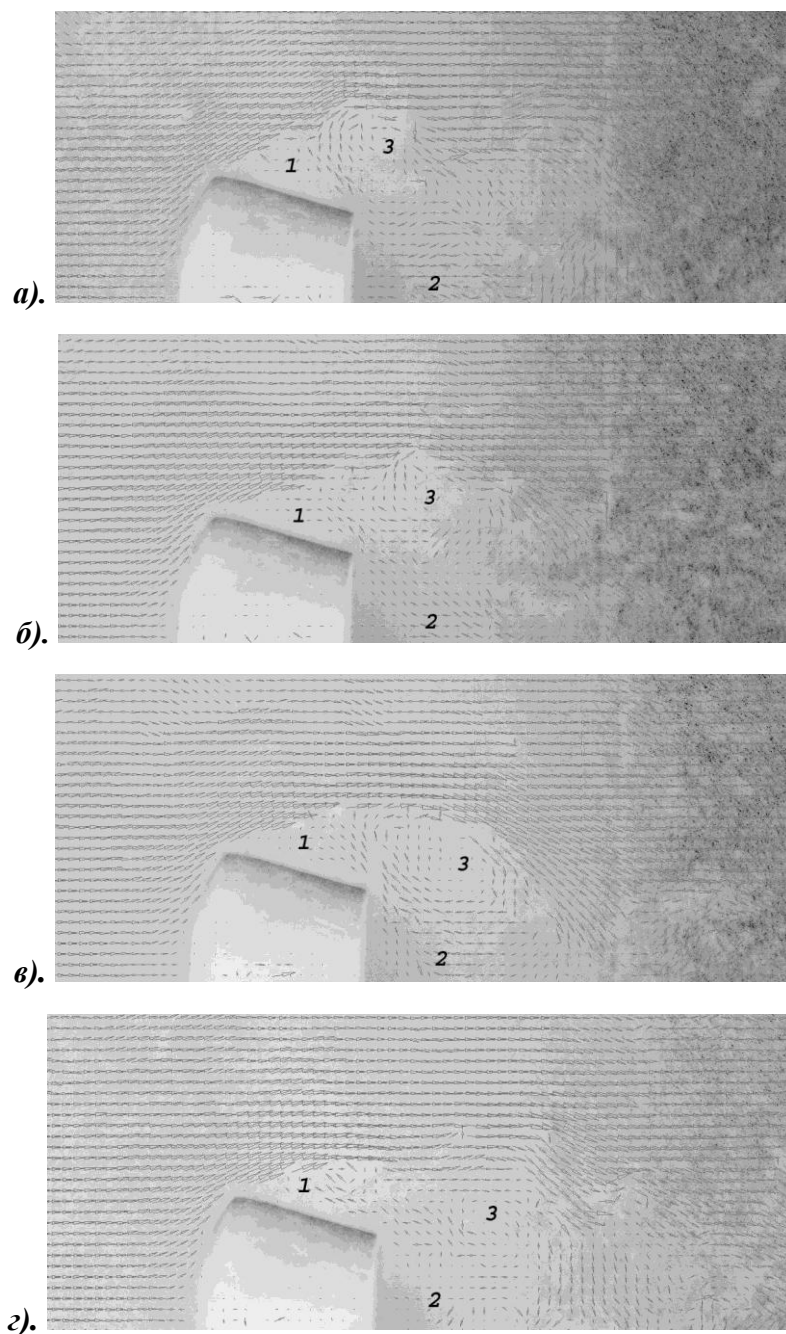


Рис.3. Поле скорости газа вблизи и в следе макета капли; 1-зона отрыва потока, 2-возвратное донное течение, 3-изолированный тороидальный вихрь

Анализ основных газодинамических структур внешнего течения показал следующие особенности обтекания такого рода тел:

- Первая (более высокая) волна зарождается еще при сферической форме капли, а ее положение совпадает с точкой отрыва потока. За точкой отрыва наблюдается зона рециркуляции с выраженным противотоком вдоль поверхности модели (область 1).
- Еще одна постоянно присутствующая структура находится в следе капли и представляет собой вторую зону рециркуляции с интенсивным противотоком вдоль оси тела (область 2). Распределение давления на донной части поверхности капли от этого импактного потока таково, что она становится плоской, а на ее границе возникает отрыв радиального

донного течения. Именно здесь формируется второй излом образующей, связанный с радиальным растеканием жидкости в погранслое на донной поверхности.

- Радиально растекающийся вдоль донной части газовый поток раздваивается вблизи второй точки излома образующей, часть его проникает в первую отрывную зону (1), а остальной поток попадает в третью постоянно присутствующую область (3). Эта вихревая структура частично разделяет две первые и представляет собой изолированный тороидальный вихрь. Непосредственно не взаимодействуя с моделью, он периодически зарождается в области ее кормового среза и дрейфует в аэродинамический след со скоростью много меньшей скорости потока (< 1 м/с).
- Сравнение теневых снимков капли в момент начала разрушения с полем внешнего течения показало, что массоунос на режиме срыва погранслоя происходит в двух кольцевых областях с острым изломом образующей, а они в свою очередь формируются в точках отрыва потока.

Таким образом, рассмотрены два возможных механизма реализации срывного разрушения капель в ударных волнах: 1) - дробление за счет “обдирки” пограничного слоя жидкости с капли и 2) - срыв частиц с гребней волновых возмущений, образующихся на наветренной поверхности капли при развитии неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. В идентичных условиях выполнены серии опытов с каплями различных жидкостей, отличающихся по физическим параметрам. Получены экспериментальные зависимости периода индукции массоуноса по этим механизмам. Показано, что в диапазоне чисел Вебера $We = 200 \div 5000$ разрушение капель осуществляется как по механизму 1, так и по механизму 2, а тип дробления определяется параметрами жидкости и потока. Получен критерий смены механизмов срывного разрушения капли. Уточнено значение критического числа Вебера, соответствующее смене механизмов. Для исследованного диапазона скоростей потока за ударной волной $50 \leq u \leq 200$ м/с сформулирована феноменологическая картина процесса, которая объясняет особенности деформации капли в период индукции разрушения.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (Гранты № 04 – 01 – 00235 и 07 – 01 - 00318).

Список литературы

1. Яненко Н.Н., Солоухин Р.И., Папырин А.Н., Фомин В.М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. Новосибирск: «Наука», 1980, 160 с.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. - М: Наука, 1987, 464 с.
3. Ивандаев А.И., Кутушев А.Г., Нигматулин Р.И. Газовая динамика многофазных сред. Ударные и детонационные волны в газозвесах. В Сб.: Механика жидкости и газа, Т.16. Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР, М., 1981, С.209-287.
4. Gelfand, В.Е. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag. //Prog. Energy Combust. Sci., 1996, V.22, pp. 201–265.
5. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В., Такаяма К. Разрушение капель жидкости. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2008. 307 с.
6. Pilch M., Erdman C.A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of liquid drop.// Int. J. Multiphase Flow , 1987, V. 13, pp. 741–757
7. Ranger A.A. Shock wave propagation through a two-phase medium. //Acta Astronaut., 1972, Vol 17, №4/5, pp.675-683
8. Hinze J.O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. //AIChE J, 1955, Vol.1, №3, pp.289-295
9. Mayer E. Theory of liquid atomization in high velocity gas streams. //ARS Journal, 1961, Vol.31, №12, pp.1783-1785
10. Бойко В.М., Папырин А.Н., Поплавский С.В. О динамике дробления капель в ударных волнах // ПМТФ. 1987, №2, С. 108-115.