

Оценка средней скорости разлета жидкости из тонкой упругой оболочки

© С.С. Меньшаков, В.Н. Охитин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Применительно к тушению лесных пожаров рассмотрено одномерное движение упругой цилиндрической оболочки, нагружаемой взрывом центрального заряда взрывчатого вещества через слой жидкого пожаротушащего реагента. При этом оболочка и реагент предполагаются массовой нагрузкой. Показано влияние основных конструктивных параметров (плотности и толщины оболочки, плотности реагента, размеров заряда и др.) на средние скорости радиального разлета жидкости и оболочки. Отмечено, что учет упругости внешней оболочки приводит к появлению максимума и дальнейшего уменьшения средней скорости ее движения. Причем чем меньше упругость внешней оболочки, тем выше значение максимума средней скорости, приобретаемой в том числе и жидким реагентом, поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы разрыв внешней оболочки происходил при достижении максимального значения средней скорости.

Ключевые слова: взрыв, детонация, жидкость, заряд, нагружение, оболочка, продукты взрыва, пузырь, скорость, упругость

Введение. Лесные пожары возникают во многих странах мира, к сожалению, часто и регулярно, причем возможности их тушения практически ничтожны из-за сложности и неэффективности самих способов тушения, вследствие чего они обычно продолжают существование до существенного изменения погоды в местах возникновения. В связи с этим в мире постоянно ведутся поиски новых методов и способов тушения лесных пожаров, а также периодически возникает интерес и к ранее известным, но уже на основе новых открывшихся возможностей и обстоятельств. Среди различных способов тушения лесных пожаров следует отметить один, называемый взрывным. Он заключается в том, что с воздушного носителя подается [1, 2] или сбрасывается [3, 4] устройство пожаротушения, доставляющее к очагу пожара специальный пожаротушащий реагент, разбрасываемый путем взрыва. Примером такого устройства является авиационное средство пожаротушения АСП-500 калибром 500 кг (рис. 1, а).

Устройство АСП-500 [4] — это авиационная бомба, выполненная в виде пластикового контейнера длиной 3295 мм и диаметром 500 мм. Ее полная масса составляет 525 кг, включая ~400 л огнетушащего реагента в жидком виде, например воды. При взрыве центрального заряда взрывчатого вещества (ВВ), расположенного вдоль оси контейнера, происходит разлет раздробленной на капли жидкости (рис. 1, б) по

поверхности земли. При этом образуется аэродисперсное облако диаметром ~ 30 м, которое и осуществляет тушение пожара на соответствующей площади.



Рис. 1. Авиационное средство пожаротушения АСП-500:

а — общий вид; *б* — один из моментов процесса формирования аэродисперсного облака

Цель работы — получение простых зависимостей для оценки средних скоростей радиального разлета жидкого реагента вместе с тонкой упругой оболочкой, что необходимо для определения эффективности пожаротушающего действия подобных устройств.

Сразу после детонации центрального заряда ВВ в контейнере начинается расширение продуктов взрыва (ПВ) в жидкости с образованием пузыря. Начинается интенсивный волнообмен между этим пузырем и оболочкой в виде ударных волн и волн разгрузки с последующим нагружением и расширением оболочки [5, 6]. Для упрощения примем, что на этом кратковременном этапе, вплоть до разрушения оболочки, жидкость и сдерживающая ее оболочка движутся с одной скоростью, т. е. представляют собой составной цилиндрический поршень, состоящий из двух разных материалов. Это сложившееся равновесие нарушается тогда, когда оболочка распадается на осколки, в связи с чем жидкость может свободно двигаться через возникающие трещины.

Следуя приведенному в работе [7], рассмотрим одномерное движение цилиндрической оболочки длиной h и толщиной δ_0 , внутри которой содержится жидкость и центральный заряд ВВ с начальными радиусами R_0 и r_0 и соответствующими им текущими размерами R , r , а также толщиной δ (рис. 2).

В [8] рассмотрена близкая задача — о разрушении космического аппарата, представляющего собой тонкую симметричную оболочку сферической или цилиндрической формы, в котором происходит взрыв соответствующего заряда ВВ. Уравнение движения оболочки, где все параметры текущие, имеет вид

$$\rho \frac{du}{dt} = \frac{p(t)}{\delta} - \alpha \frac{\sigma_\theta}{R}, \quad (1)$$

где ρ — плотность; u — скорость; t — время; $p(t)$ — давление, действующее на оболочку; δ — толщина оболочки; α — параметр симметрии (индексы: 0 — плоская, 1 — цилиндрическая, 2 — сферическая); σ_θ — кольцевое усилие (среднее по толщине напряжение); R — радиус оболочки.

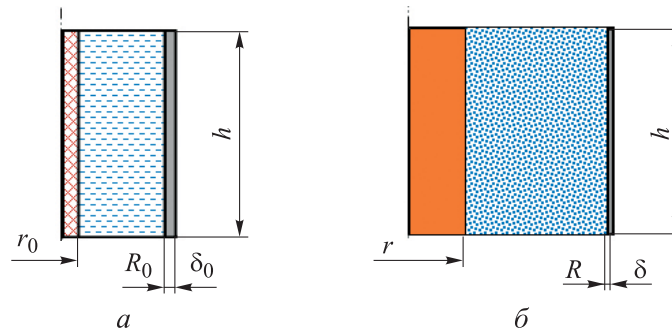


Рис. 2. Начальные (а) и текущие (б) размеры составного цилиндрического поршня в процессе его движения под действием расширяющихся продуктов взрыва

Уравнение (1) записано для единицы объема оболочки, что неудобно для рассматриваемого случая, так как здесь оболочка составная. Поэтому приведем (1) к форме Покровского — Гарни путем умножения на объем оболочки. При этом к массе оболочки добавим массу жидкости и массу части ПВ [9], принимая их скорости равными. Соответствующее модельное уравнение движения, рассматриваемого как массовая нагрузка составного цилиндрического поршня, возникающего под действием расширяющихся ПВ, будет иметь вид

$$\left(M + m_l + \frac{m_0}{2} \right) \frac{du}{dt} = Sp + F \frac{h}{R}, \quad (2)$$

где M , m_l , m_0 — массы оболочки, жидкости и заряда ВВ соответственно; u — средняя скорость оболочки, жидкости и ПВ (при линейном законе расширения ПВ от 0 на оси симметрии до скорости u , в связи с чем на границе пузыря средняя скорость ПВ составит $u/2$); S — текущая площадь поверхности пузыря ПВ, $S = 2\pi rh$ (r — текущий радиус расширения пузыря, h — длина заряда ВВ (оболочки)); p — давление на жидкое снаряжение со стороны ПВ; F — сила упругости, сдерживающая расширение оболочки.

Уравнение (2) отличается от приведенного в [7] наличием второго слагаемого в правой части, учитывающего возникающие при

расширении упругие напряжения в оболочке. Тогда, переходя от t к переменной r и принимая выражение для силы упругости

$$F = -k(R - R_0), \quad (3)$$

где k — коэффициент пропорциональности; R_0 — начальный радиус оболочки, получим

$$\left(M + m_l + \frac{m_0}{2}\right)u \frac{du}{dr} = Sp + F \frac{h}{R}. \quad (4)$$

Для определения изменения давления p в ПВ используем зависимость $pV^\gamma = \text{const}$, где V — текущий объем ПВ. Тогда при $\gamma = 3$ получим

$$p = p_H \left(\frac{V_0}{V}\right)^3 = p_H \left(\frac{\pi r_0^2 h}{\pi r^2 h}\right)^3 = p_H \left(\frac{r_0}{r}\right)^6,$$

где $p_H = \rho_0 D^2/8$ — давление мгновенной детонации; ρ_0 , D — плотность и скорость детонации заряда ВВ; r_0 — начальный радиус заряда.

Тогда

$$\left(M + m_l + \frac{m_0}{2}\right)u \frac{du}{dr} = 2\pi r h \frac{\rho_0 D^2}{8} - k(R - R_0) \frac{h}{R},$$

или

$$\left(M + m_l + \frac{m_0}{2}\right)u \frac{du}{dr} = \frac{m_0 D^2}{4} \frac{r_0^4}{r^5} - k(R - R_0) \frac{h}{R}, \quad (5)$$

где $m_0 = \pi r_0^2 h \rho_0$ — масса заряда ВВ.

Для жидкого снаряжения в процессе его движения имеем

$$R^2 - r^2 = R_0^2 - r_0^2,$$

откуда

$$R = \sqrt{R_0^2 + r^2 - r_0^2}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим в окончательном виде дифференциальное уравнение

$$\left(M + m_l + \frac{m_0}{2}\right)u \frac{du}{dr} = \frac{m_0 D^2}{4} \frac{r_0^4}{r^5} - kh \left(\frac{\sqrt{R_0^2 + r^2 - r_0^2} - R_0}{\sqrt{R_0^2 + r^2 - r_0^2}} \right),$$

интегрируя его в диапазоне от r_0 до r , определим скорость движения:

$$u = \sqrt{\frac{2\beta}{2+\beta} \left\{ \frac{D^2}{8} \left[1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^4 \right] - \frac{2kh}{m_0} \left((r - r_0) - R_0 \ln \frac{r + \sqrt{r^2 + a^2}}{r_0 + R_0} \right) \right\}}, \quad (7)$$

где $\beta = m_0 / (M + m_l)$ — коэффициент взрывной нагрузки; $a^2 = R_0^2 - r_0^2$.

В процессе движения оболочки масса ее остается постоянной вплоть до разрушения. В момент времени $t = 0$ получим $M = 2\pi R_0 h \delta_0 \rho$, а в произвольный момент времени t — $M = 2\pi R h \delta \rho$. Отсюда следует, что

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\delta_0}{\delta}.$$

Тогда текущее напряжение в оболочке определяется выражением

$$\sigma = \frac{|F|}{S_r} = \frac{k(R - R_0)}{2\pi R \delta} = \frac{k(R - R_0)}{2\pi R_0 \delta_0} = \frac{k}{2\pi \delta_0} \varepsilon = E \varepsilon,$$

или

$$\sigma = \frac{|F|}{S_r} = \frac{k(R - R_0)}{2\pi R \delta} = \frac{k(R - R_0)}{2\pi R_0 \delta_0} = \frac{k}{2\pi \delta_0} \varepsilon = E \varepsilon.$$

Здесь E — модуль упругости; ε — деформация; S_r — площадь сечения оболочки, откуда следует $k = 2\pi \delta_0 E$.

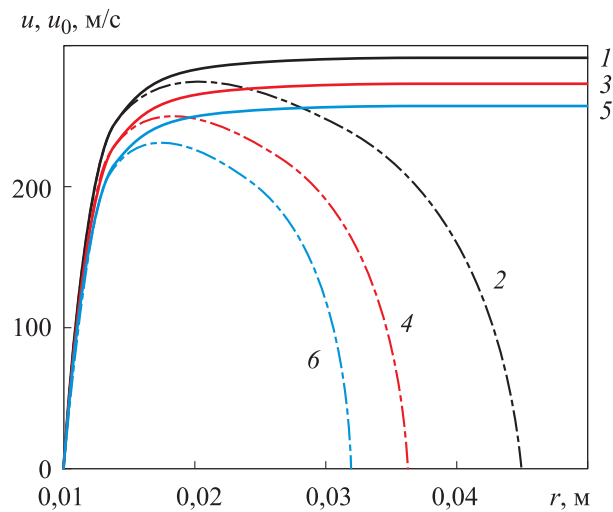


Рис. 3. Зависимости средней скорости стальной оболочки от радиуса пузыря ПВ для трех значений ее толщины δ_0 :
1, 2 — 1 мм; 3, 4 — 2 мм; 5, 6 — 3 мм

Аналогично приведенному в работе [10], на рис. 3 представлены зависимости средней скорости стальной оболочки от радиуса пузыря ПД для трех значений толщин δ_0 оболочки, равных 1, 2 и 3 мм, рассчитанных по (7) для u (нечетные кривые 1, 3, 5) и по формуле

$$u_0 = \sqrt{\frac{2\beta}{2+\beta} \left\{ \frac{D^2}{8} \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^4 \right] \right\}}$$

(четные кривые 2, 4, 6), определенные по формуле (7) при $k = 0$.

Для расчетов была принята оболочка из стали плотностью $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$, длиной $h = 0,4 \text{ м}$ и с начальным радиусом $R_0 = 0,1 \text{ м}$. Толщина δ_0 оболочки варьировалась — 1, 2, 3 мм и соответственно изменялась ее масса M . Модуль упругости E был задан равным $20 \cdot 10^{10} \text{ Па}$. В качестве жидкости была выбрана вода плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. Заряд ВВ из тротила имел начальный радиус $r_0 = 0,01 \text{ м}$, плотность $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$, скорость детонации $D = 7000 \text{ м/с}$.

Основные расчетные параметры, а также максимальная скорость, определяемая по зависимости Покровского — Гарни

$$u_{\max} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\beta}{2+\beta}}$$

приведены в таблице.

Основные расчетные параметры

Параметр	Значения параметров для оболочки толщиной δ_0 , м		
	0,001	0,002	0,003
m_0 , кг	0,201	0,201	0,201
m_1 , кг	12,441	12,441	12,441
M , кг	1,983	3,985	6,008
β	0,014	0,012	0,011
u_{\max} , м/с	291,189	272,978	257,668
k	$1,257 \cdot 10^9$	$2,513 \cdot 10^9$	$3,77 \cdot 10^9$

Закключение. Учет упругости внешней оболочки приводит к появлению максимума и дальнейшего уменьшения средней скорости ее движения, а в предельном случае сверхпрочной оболочки — вплоть до полной остановки ($u = 0$). Чем меньше упругость внешней оболочки, тем выше значение максимума средней скорости, приобретаемой в том числе и жидким снаряжением. Следует отметить, что необходимо стремиться к тому, чтобы разрыв внешней оболочки происходил в момент достижения средней скоростью максимального значения. Скорости, полученные по зависимостям Покровского — Гарни, можно рассматривать как масштабы для обезразмеривания, так как они являются константами, имеющими предельные значения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Субратов А.А., Захматов В.Д., Субратов И.А., Пивоварова М.А. *Способ тушения лесных, степных и других пожаров и устройство для его осуществления*. Пат. № 2146545 Российская Федерация, 2000, бюл. № 8, с. 9.
- [2] Забегаев В.И. *Способ тушения пожара и устройство для его реализации*. Пат. № 2319529 Российская Федерация, 2008, бюл. № 8, с. 7.
- [3] Герасимов А.В. *Противопожарная авиабомба*. Пат. № 2479439 Российская Федерация, 2012, бюл. № 1, с. 7.
- [4] Кореньков В.В., Терешин А.А., Супрунов Н.А., Власов В.Ф., Тихомиров А.А., Кишкурно В.Т., Копылов Н.П., Цариченко С.Г. *Авиационное средство пожаротушения*. Пат. № 2242259 Российская Федерация, 2004, бюл. № 35, с. 7.
- [5] Меньшаков С.С., Охитин В.Н. Моделирование течения сред при взрывном нагружении ограниченного объема жидкости. *Труды Международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения»*. Саров, 2005, с. 785–789.
- [6] Бойко М.М., Меньшаков С.С., Охитин В.Н., Григорьев Г.С. Экспериментальные исследования взрывного диспергирования жидкостей. *Труды Международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения»*. Саров, 2005, с. 796–800.
- [7] Gao Hong-Quan, Lu Fang-Yun, Luo Yong-Feng, Wang Shao-Long, Hu Jian, Yuan Wei, Qin Zhi-Qiang. Study on the influence of the outer shell thickness on the SEFAE damage-power. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, vol. 25, no. 1, pp. 68–72.
- [8] Киселев А.Б. Простейшие математические модели разрушения космического аппарата при взрыве. *ПМТФ*, 1995, т. 36, № 2, с. 159–165.
- [9] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. Изд. 3-е, испр. В 2 т. Москва, Физматлит, 2004, т. 2, 656 с.
- [10] Колобанова А.Е., Охитин В.Н., Томилов П.Г. Нагружение упругопластического цилиндра внутренним давлением через слой жидкости. *Проблемы прочности*, 1988, № 5, с. 93–98.

Статья поступила в редакцию 22.04.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Меньшаков С.С., Охитин В.Н. Оценка средней скорости разлета жидкости из тонкой упругой оболочки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 5.

Меньшаков Сергей Степанович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор 115 научных трудов. Область научных интересов: газодинамика, механика сплошных сред, физика горения и взрыва, электродинамика. e-mail: menshakovss@bmstu.ru

Охитин Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор 300 научных трудов. Область научных интересов: газодинамика, механика сплошных сред, физика горения и взрыва. e-mail: okhitin@bmstu.ru

Estimating the liquid dispersion average speed from a thin elastic shell

© S.S. Menshakov, V.N. Okhitin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The paper considers the one-dimensional motion of an elastic cylindrical shell in relation to extinguishing the forest fires. The shell is loaded by explosion of the explosive central charge through a layer of the liquid fire-extinguishing agent. In this case, the shell and the reagent are assumed to be a mass load. The paper indicates influence of the main design parameters (density and thickness of the shell, reagent density, charge dimensions, etc.) on the average speed of the liquid and shell radial dispersion. It notes that accounting for the outer shell elasticity leads to the maximum and further decreasing average speed of its motion. Moreover, the lower the outer shell elasticity, the higher is the maximum average speed value, which is also acquired by the liquid reagent. Therefore, it is necessary to aim at ensuring that the outer shell ruptures when the average speed maximum value is reached.

Keywords: explosion, detonation, liquid, charge, loading, shell, explosion products, bubble, speed, elasticity

REFERENCES

- [1] Subratov A.A., Zakhmatov V.D., Subratov I.A., Pivovarova M.A. *Sposob tusheniya lesnykh, stepnykh i drugikh pozharov i ustroystvo dlya ego osuschestvleniya* [A method for extinguishing forest, steppe and other fires, and a device for its implementation]. Patent No. 2146545 Russian Federation, 2000, bulletin no. 8, p. 9.
- [2] Zabegaev V.I. *Sposob tusheniya pozhara i ustroystvo dlya ego realizatsii* [A method for extinguishing fire and a device for its implementation]. Patent No. 2319529 Russian Federation, 2008, bulletin no. 8, p. 7.
- [3] Gerasimov A.V. *Protivopozharnaya aviabomba* [Firefighting aviation bomb]. Patent No. 2479439 Russian Federation, 2012, bulletin no. 1, p. 7.
- [4] Korenkov V.V., Tereshin A.A., Suprunov N.A., Vlasov V.F., Tikhomirov A.A., Kishkurno V.T., Kopylov N.P., Tsarichenko S.G. *Aviatsionnoe sredstvo pozharotusheniya* [Aviation fire extinguishing equipment]. Patent No. 2242259 Russian Federation, 2004, bulletin no. 35, p. 7.
- [5] Menshakov S.S., Okhitin V.N. Modelirovanie techeniya sred pri vzryvnom nagruzhennii ogranichenogo obyema zhidkosti [Simulating the flow of media under explosive loading of the limited volume of liquid]. In: *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii "VII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya"* [Proceedings of the international conference "VII Kharitonov thematic scientific readings"]. Sarov, 2005, pp. 785–789.
- [6] Boyko M.M., Menshakov S.S., Okhitin V.N., Grigoriev G.S. Eksperimentalnye issledovaniya vzryvnogo dispergirovaniya zhidkostey [Experimental studies of the liquids explosive dispersion]. In: *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii "VII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya"* [Proceedings of the international conference "VII Kharitonov thematic scientific readings"]. Sarov, 2005, pp. 796–800.
- [7] Gao Hong-Quan, Lu Fang-Yun, Luo Yong-Feng, Wang Shao-Long, Hu Jian, Yuan Wei, Qin Zhi-Qiang. Study on the influence of the outer shell thickness on

- the SEFAE damage-power. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, vol. 25, no. 1, pp. 68–72.
- [8] Kiselev A.B. Prosteyshie matematicheskie modeli razrusheniya kosmicheskikh apparatov pri vzryve [Simple mathematical models of the explosive failure of a spacecraft]. *PMTF — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1995, vol. 36, no. 2, pp. 159–165.
- [9] Orlenko L.P., red. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. 3rd edition, rev. In 2 volumes. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004, vol. 2, 656 p.
- [10] Kolobanova A.E., Okhitin V.N., Tomilov P.G. Nagruzhenie uprugoplasticheskogo tsilindra vnutrennim davleniem cherez sloj zhidkosti [Loading of an elastoplastic cylinder with internal pressure through a layer of liquid]. *Problemy prochnosti — Strength of Materials*, 1988, no. 5, pp. 93–98.

Menshakov S.S., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of High-Precision Aircraft, Bauman Moscow State Technical University; author of 115 scientific works. Research interests: gas dynamics, continuum mechanics, physics of combustion and explosion, electrodynamics. e-mail: menshakovss@bmstu.ru

Okhitin V.N., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of High-Precision Aircraft, Bauman Moscow State Technical University; Author of 300 scientific works. Research interests: gas dynamics, continuum mechanics, physics of combustion and explosion. e-mail: okhitin@bmstu.ru