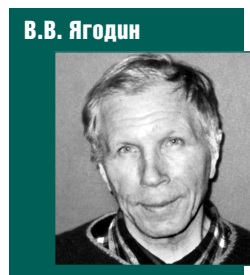
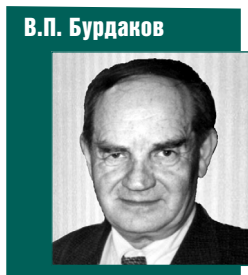


# ЛАЗЕРНОЕ ЗАЖИГАНИЕ УНИТАРНОГО ТОПЛИВА В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

## ЧАСТЬ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**В.П. Бурдаков**, Член Президиума АИИ им. А.М. Прохорова, д-р. техн. наук, профессор

**В.В. Ягодин**, ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, канд. техн. наук



*Данная статья является продолжением статей, опубликованных в журналах № 1, № 2 и № 4 за 2009 г. Рассматриваются вопросы экспериментального моделирования процесса воспламенения твёрдого горючего в унитарных топливах в окислительной среде, относящиеся к плазменно-энергетическим технологиям топливоиспользования [1].*

Вновь созданные экспериментальные устройства позволили получить первые уникальные результаты по лазерному воздействию на материалы, имитирующие реальные материалы топливных микрогранул ТМГ, входящих в состав унитарных пульпообразных топлив для ЖРД. При этом на разработанные методы воздействия лазерного импульса на модели ТМГ был получен (табл. 1) ряд патентов (патентообладатель ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва):

Для определения формы каверны и установления наиболее выгодных режимов лазерного воздействия на ТМГ изготавливается модель обрабатываемого объекта, состоящая из нескольких тонких слоёв того

же материала [1]. Например, при обработке массивного полиэтиленового или алюминиевого образца изготавливаются модели (они описаны в предыдущей публикации) из нескольких тонких слоёв полиэтиленовой плёнки или из алюминиевой фольги с толщиной пакета несколько большей, нежели обрабатываемый образец.

Предложенный способ позволяет легко и быстро определить зависимость глубины резания материала (или глубины перфорирования) для данной плотности потока энергии и длительности лазерного импульса от скорости перемещения поверхности конкретного образца относительно лазерного луча. В частности, можно определить скорость резания листового материала при

минимальной плотности потока энергии лазерного луча.

Экспериментальные зависимости выброшенного (испарившегося, вылетевшего в виде твёрдых фрагментов или сгоревшего в атмосфере) материала определяются формой каверны, а более грубо — средними значениями её глубины  $h$ , длины в направлении движения  $L$  и ширины  $b$ . Они зависят от подведённой мощности лазерного луча, но зависимость эта — нелинейная (табл. 2-6). В таблицах приведена шкала скоростей и допустимые зоны скоростей, определяемые передаточными отношениями шкивов. Экспериментальное устройство описано в предыдущей публикации.

Оказалось, что у моделей № 4 и № 5 (перемежающиеся слои А1 и ПЭ) результат зависит от того, какой слой — А1 или ПЭ — расположен ближе к излучателю, поэтому в табл. 5 и 6 результаты даны в виде дроби — верхние цифры соответствуют случаю, когда первый слой пакета из алюминия.

И ещё одно наблюдение: если верхним слоем оказывается прозрачный полиэтилен (ПЭ) — даже с коэффициентом черноты 0,5, каверна начинается не с него, а со слоя из А1, но далее в глубину разрезаются все слои, причём размеры каверн у слоёв ПЭ и А1 практически не отличаются.

Таблица 1

№№ п/п	Номер патента	Дата решения о выдаче	Дата приоритета	Название
1.	2065990	11.07.1995	11.04.1994	Способ зажигания горючей смеси в камере сгорания и система для его осуществления
2.	2253101	14.12.2004	08.08.2003	Устройство воздействия на объект сфокусированным лазерным лучём
3.	2261784	24.02.2005	06.10.2003	Устройство для определения параметров резания объектов сфокусированным лазерным лучём
4.	2285598	27.03.2006	14.01.2004	Способ определения параметров воздействия лазерным импульсом на объект обработки

Таблица 2. Экспериментальные результаты для модели № 1

Модель № 1 (А1)	Энергия луча, Дж											
	8	9,5	13,5	15	8	9,5	13,5	15	8	9,5	13,5	15
	Длительность импульса, мс											
	2	2,5	4	5	2	2,5	4	5	2	2,5	4	5
	Поток энергии излучения, 10 <sup>-6</sup> Вт/см <sup>2</sup>											
1,4	1,7	2,4	2,6	1,4	1,7	2,4	2,6	1,4	1,7	2,4	2,6	
Шкала скоростей v, м/с	Глубина каверны h, мм				Длина каверны L, мм				Ширина каверны b, мм			
7	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0
6	<0,1	<0,1	0,1	0,1	6	9	15	20	0,3	0,3	0,3	0,3
5	0,3	0,4	0,6	0,6	5	7	12	15	0,3	0,3	0,3	0,3
4	0,8	0,9	1,2	1,3	4	5	8	10	0,3	0,3	0,3	0,3
3	1,9	2	2,5	2,6	2	2,5	4	5	0,4	0,4	0,4	0,4
2	2,8	3	3,5	3,7	0,5	0,5	0,6	0,7	0,5	0,5	0,6	0,7
1												
0												

Таблица 3. Экспериментальные результаты для модели № 2

Модель № 2 ПЭ <sub>0,5</sub>	Энергия луча, Дж											
	8	9,5	13,5	15	8	9,5	13,5	15	8	9,5	13,5	15
	Длительность импульса, мс											
	2	2,5	4	5	2	2,5	4	5	2	2,5	4	5
	Поток энергии излучения, 10 <sup>-6</sup> Вт/см <sup>2</sup>											
1,4	1,7	2,4	2,6	1,4	1,7	2,4	2,6	1,4	1,7	2,4	2,6	
Шкала скоростей v, м/с	Глубина каверны h, мм				Длина каверны L, мм				Ширина каверны b, мм			
7	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
6	0	0	0	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0,1	0,1	0,1	0,2	6	8	12	15	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
4	0,2	0,3	0,5	0,6	5	7	12	13	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
3	0,8	1,1	1,3	1,6	4	5	8	10	0,2	0,2	0,2	0,2
2	2,1	2,5	3,1	3,4	2	2	4	5	0,3	0,3	0,3	0,3
1	3,5	3,8	4,3	4,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
0												

Таблица 4. Экспериментальные результаты для модели № 3

Модель № 3 ПЭ <sub>0,9</sub>	Энергия луча, Дж											
	8	9,5	13,5	15	8	9,5	13,5	15	8	9,5	13,5	15
	Длительность импульса, мс											
	2	2,5	4	5	2	2,5	4	5	2	2,5	4	5
	Поток энергии излучения, 10 <sup>-6</sup> Вт/см <sup>2</sup>											
1,4	1,7	2,4	2,6	1,4	1,7	2,4	2,6	1,4	1,7	2,4	2,6	
Шкала скоростей v, м/с	Глубина каверны h, мм				Длина каверны L, мм				Ширина каверны b, мм			
7	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0
6	0	0,1	0,1	0,2	15	17	20	25	0,1	0,1	0,1	0,1
5	0,1	0,2	0,2	0,3	15	16	19	22	0,3	0,3	0,4	0,4
4	0,2	0,3	0,5	0,6	15	16	17	20	0,5	0,5	0,6	0,7
3	0,4	0,5	0,7	0,8	4	5	11	15	0,8	0,8	0,9	0,9
2	1,1	1,2	1,5	1,8	5	6	8	10	1,1	1,2	1,2	1,3
1	2,2	3,0	3,3	3,6	2	3	4	6	1,3	1,3	1,3	1,4
0	3,8	4,5	5,1	5,8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Таблица 5. Экспериментальные результаты для модели № 5

Модель № 5 ПЭ <sub>0,9</sub> /Al	Энергия луча, Дж											
	8	9,5	13,5	15	8	9,5	13,5	15	8	9,5	13,5	15
	Длительность импульса, мс											
	2	2,5	4	5	2	2,5	4	5	2	2,5	4	5
	Поток энергии излучения, 10 <sup>-6</sup> Вт/см <sup>2</sup>											
1,4	1,7	2,4	2,6	1,4	1,7	2,4	2,6	1,4	1,7	2,4	2,6	
Шкала скоростей v, м/с	Глубина каверны h, мм				Длина каверны L, мм				Ширина каверны b, мм			
7	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0
6	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0
5	0	0	0	0	13	15	18	21	0,1	0,1	0,2	0,2
4	0,1	0,2	0,2	0,3	14	15	19	21	0,2	0,3	0,3	0,4
3	0,1	0,1	0,2	0,2	8	9	18	20	0,3	0,3	0,3	0,4
2	0,1	0,1	0,2	0,2	8	9	18	20	0,4	0,5	0,6	0,7
1	0,2	0,2	0,3	0,3	5	6	9	12	0,3	0,3	0,4	0,4
0	0,6	0,7	0,8	0,9	6	7	10	13	0,7	0,8	0,9	1,1
7	0,8	0,9	1,0	1,1	2	3	7	9	0,4	0,5	0,6	0,7
6	1,3	1,4	1,5	1,7	3	5	8	10	0,8	0,9	1,1	1,3
5	1,9	2,2	2,5	2,7	2	3	4	6	0,5	0,6	0,6	0,7
4	2,2	2,5	2,8	3,3	2	3	4	6	1,0	1,1	1,2	1,3
3	3,0	3,3	3,6	3,8	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	0,8	0,9
2	3,3	3,7	4,1	4,4	0,8	0,8	0,9	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4

Таблица 6. Экспериментальные результаты для модели № 7

Модель № 7 ПЭ <sub>0,5</sub> /Al  Шкала скоростей v, м/с	Энергия луча, Дж											
	8	9,5	13,5	15	8	9,5	13,5	15	8	9,5	13,5	15
	Длительность импульса, мс											
	2	2,5	4	5	2	2,5	4	5	2	2,5	4	5
	Поток энергии излучения, 10 <sup>-6</sup> Вт/см <sup>2</sup>											
1,4	1,7	2,4	2,6	1,4	1,7	2,4	2,6	1,4	1,7	2,4	2,6	
Глубина каверны h, мм				Длина каверны L, мм				Ширина каверны b, мм				
7	-	-	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0	0	0,1	0,1	-	-	18	21	0,1	0,1	0,1	0,1
4	0,1	0,1	0,1	0,1	12	13	15	17	0,1	0,1	0,1	0,1
3	0,2	0,2	0,2	0,2	13	15	16	18	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,3	0,3	0,3	0,3	6	8	11	12	0,1	0,1	0,1	0,1
1	0,6	0,6	0,7	0,7	6	8	11	12	0,1	0,1	0,1	0,1
0	2,0	2,0	2,1	2,1	5	6	8	10	0,2	0,2	0,2	0,2
	2,3	2,3	2,4	2,5	5	6	8	10	0,3	0,3	0,3	0,3
	2,1	2,1	2,2	2,3	2	3	4	6	0,7	0,7	0,7	0,7
	2,7	2,8	2,9	2,9	2	3	4	6	1	1	1	1
	3,2	3,2	3,3	3,3	1	1	1	1	1	1	1	1
	3,9	3,9	4,0	4,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2

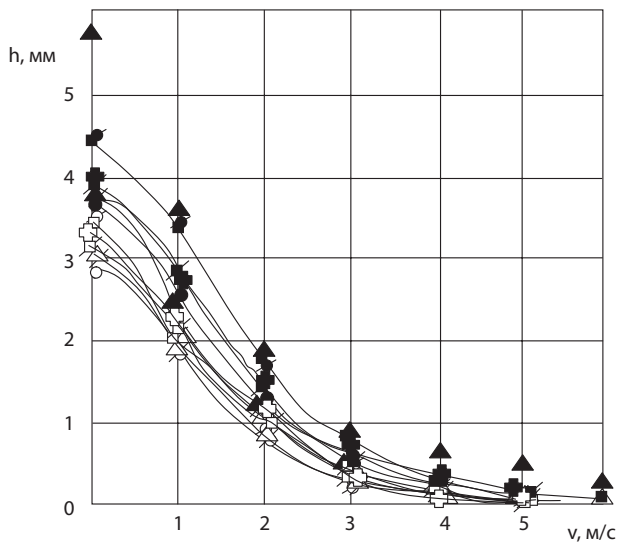


Рис. 1. Зависимости глубины перфораций от скорости перемещения поверхности моделей относительно лазерного луча и его энергетических характеристик:

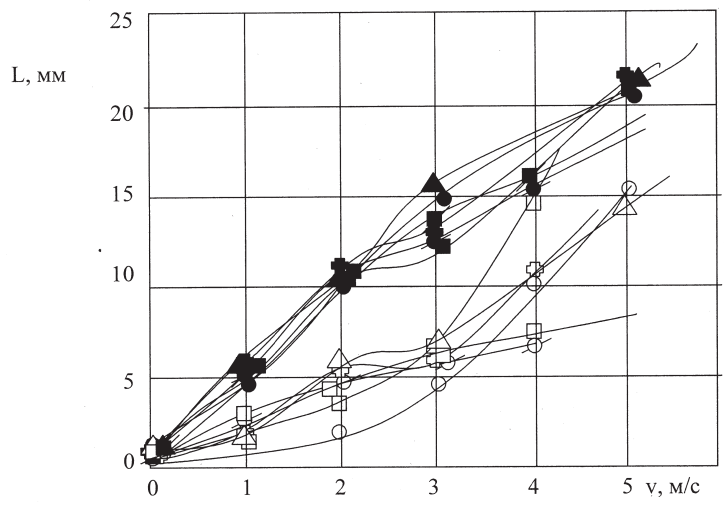


Рис. 2. Зависимости длины перфораций от скорости перемещения поверхности моделей относительно лазерного луча и его энергетических характеристик

Параметры луча:		E = 8 Дж; τ = 2 мс	E = 15 Дж; τ = 5 мс
№ модели	Состав	○	●
1	Al	○	●
2	ПЭ <sub>0,5</sub>	○	●
3	ПЭ <sub>0,9</sub>	△	▲
4	Al/ПЭ <sub>0,9</sub>	△	▲
5	ПЭ <sub>0,9</sub> /Al	□	■
6	Al/ПЭ <sub>0,5</sub>	□	■
7	ПЭ <sub>0,5</sub> /Al	⊕	⊕

Большинство приведенных данных — среднеарифметические, рассчитанные по 2–6 замерам.

Для удобства практического использования экспериментальных результатов данные табл. 2–6 представлены в обобщенном виде. Зависимость глубин перфорирования от различных параметров приведена на рис. 1.

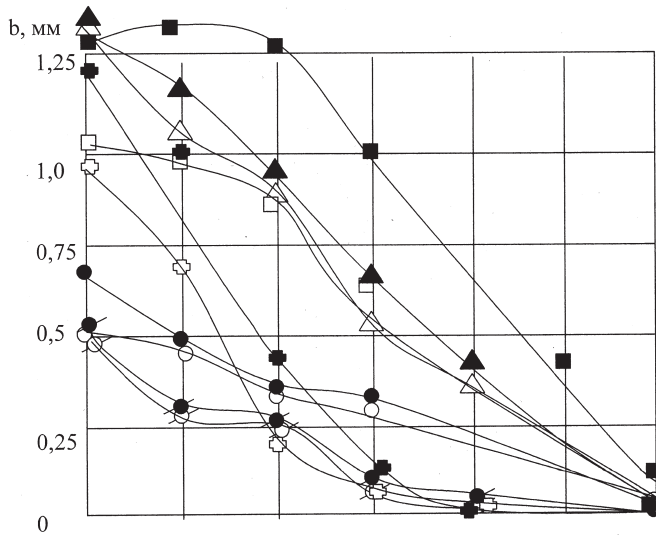


Рис. 3. Зависимости ширины перфораций от скорости перемещения поверхности моделей относительно лазерного луча и его энергетических характеристик

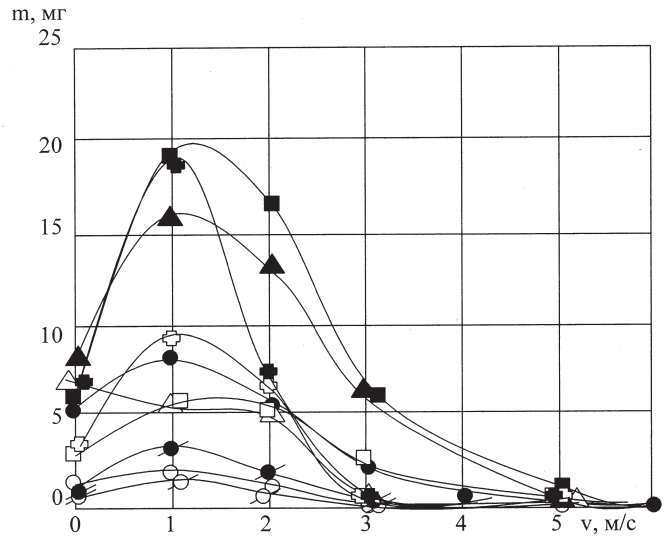


Рис. 4. Зависимости массы выброшенного материала от скорости перемещения поверхности моделей относительно лазерного луча и его энергетических характеристик

Данные по длине каверн приведены на рис. 2, а по их ширине — на рис. 3.

На рис. 4 представлены зависимости массы выброшенного из каверны горючего материала от скорости перемещения поверхности образца.

Расчёты велись по формуле

$$m = h \cdot L \cdot b \cdot \rho \cdot \Phi,$$

где  $h, L, b, \rho$  — соответственно, средняя глубина, длина, ширина каверны и плотность материала модели. Для образца № 1 (алюминий) плотность равна  $2,7 \text{ мг/мм}^3$ , для образцов № 2,3 (полиэтилен) —  $0,83 \text{ мг/мм}^3$ , а для образцов № 5, 7 (полиэтилен с алюминием) —  $1,76 \text{ мг/мм}^3$ .  $\Phi$  — коэффициент формы каверны, учитывающий отклонение от параллелепипеда. Оказалось, что длительная и очень кропотливая работа по разделению слоёв моделей и измерению перфорации в каждом слое с целью определения истинной формы каверны свелась к определению коэффициента  $\Phi$ , который изменялся в пределах от 0,7 до 0,9. Учитывая, что все опыты производились в

воздушной среде, а для целей зажигания унитарного топлива лазерное воздействие на ТМГ будет происходить в кислородной среде, увеличивающей размеры каверны, было решено во всех расчётах не использовать значение коэффициента формы и принимать  $\Phi = 1,0$ .

Зная количество выброшенной из каверны разогретой массы, нетрудно определить энергию, поступившую в окружающее пространство:

$$E = m \cdot c_p \cdot T_x, \text{ Дж} \quad (1)$$

где  $m$  — количество выброшенной из каверны массы, кг,  $c_p$  — теплоёмкость выброшенного материала, Дж/(кг · К), которая была приведена ранее,  $T_x$  — характерная средняя температура выброшенного материала, К, в качестве которой для предварительных анализов принимается температура самовоспламенения материала ТМГ (полиэтилена или алюминия) в газообразном кислороде, т.е. 541 К или 1000 К, хотя реальная температура возгонки выброшенного из каверны материала — намного выше. Для

расчётов принимаем минимальное значение  $T_x = 541 \text{ К}$ .

Таким образом, для оценки эффективности лазерного зажигания различных твёрдых материалов достаточно иметь экспериментальную установку, имитирующую движущуюся мишень. Для реальной организации процесса зажигания необходимо знать точное значение фокусного расстояния лазерного луча от головки с учётом его прохождения через конкретное оптическое окно. Зная фокусное расстояние, поля течений и другие начальные условия в камере сгорания, всегда можно расположить этот фокус в самом выгодном, с точки зрения минимума подводимой энергии луча, месте.

Для того, чтобы полученные экспериментальные результаты использовать для оценки эффективности лазерного зажигания при запуске ЖРД, необходимо по (1) рассчитать энергию иницирования горения. Соответствующие данные для испытанных моделей приведены на рис. 5–9.

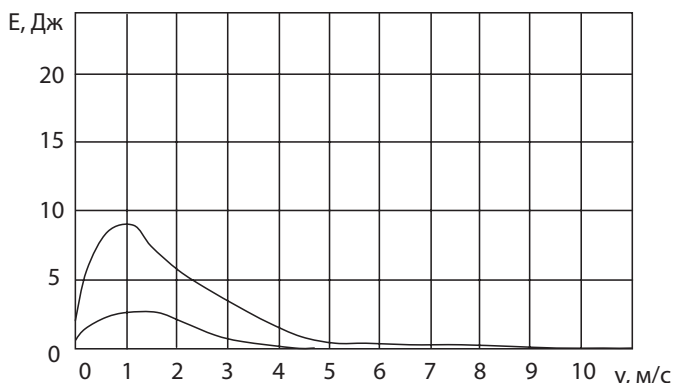


Рис. 5. Энергия, выделенная на модели № 1 (Al)

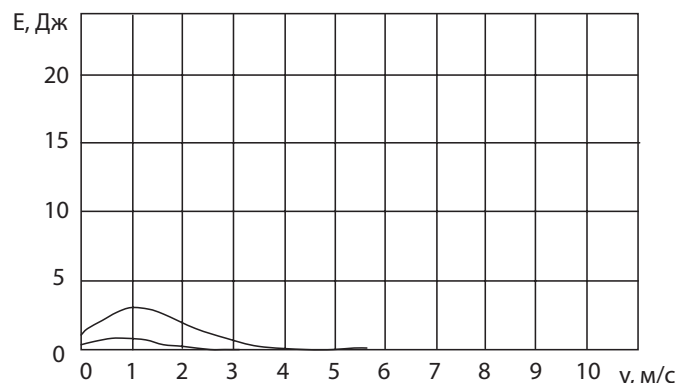


Рис. 6. Энергия, выделенная на модели № 2 (ПЭ<sub>0,5</sub>)

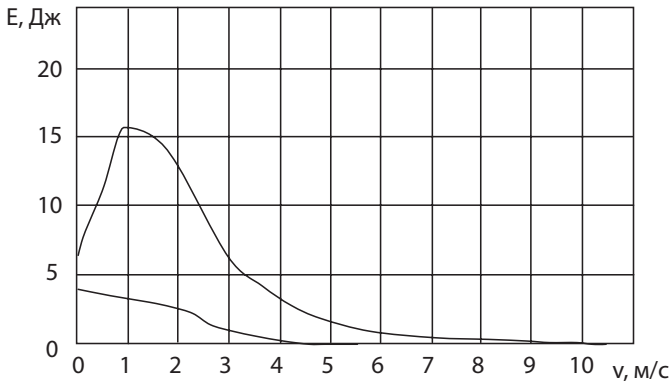


Рис. 7. Энергия, выделенная на модели № 3 (ПЭ<sub>0,9</sub>)

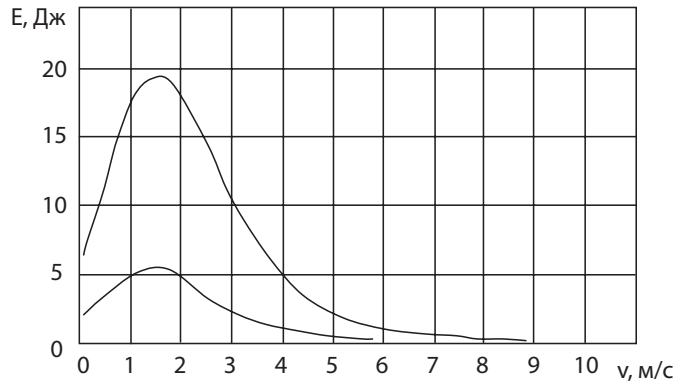


Рис. 8. Энергия, выделенная на модели № 5 (ПЭ<sub>0,9</sub>/Al)

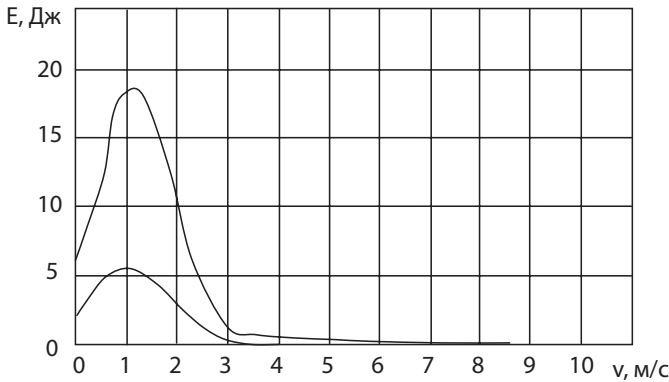


Рис. 9. Энергия, выделенная на модели № 7 (ПЭ<sub>0,5</sub>/Al)

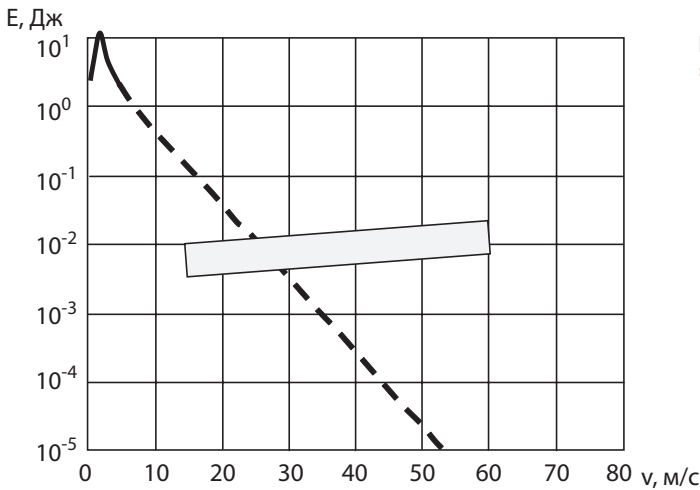


Рис. 10. Усреднённая энергия, выделенная на моделях № 5 и № 7 (экстраполяция на скорости движения поверхности модели, превышающие 6 м/с)

Сравнение полученных данных с известным из литературы обширным материалом по инициированию горения различных горючих с воздухом и с кислородом позволит определить реально потребную энергию лазерного зажигания по сравнению с энергией импульса искрового зажигания.

На всех рисунках верхние кривые соответствуют энергии лазерного луча 15 Дж, а нижние — 8 Дж. Для верхних кривых выделенная энергия в своих пиковых значениях больше подводимой, что можно объяснить догоранием в воздухе выброшенного материала и за счёт этого увеличения в размерах самой каверны.

Как и ранее, большое влияние на выделяемую энергию оказывает длительность импульса (5 мс для верхних и 2 мс для нижних кривых), а также скорость движения поверхности модели относительно фокуса лазерного луча.

Рассмотрим зависимость выделяемой энергии от скорости движения поверхности ТМГ (с учётом её вращения) относительно лазерного луча, причём для конкретного массового состава ТМГ (41% Al и 59% полиэтилена), обеспечивающего нулевую плавучесть ТМГ в кислороде. С этой целью данные рис. 8 и 9, полученные для другого массового состава ТМГ (25% Al и 85% полити-

лена), следует усреднить (для энергии лазера 10 Дж), скорректировать на состав ТМГ с использованием данных рис. 6–7 и построить в полулогарифмической шкале для экстраполяции на более высокие значения скорости движения поверхности ТМГ относительно фокуса лазерного луча. Соответствующая зависимость приведена на рис. 10. Эта зависимость и будет отправной при анализе эффективности лазерного зажигания.

Для сравнения на том же рис. 10 приведены литературные данные [2–4] по энергии искрового зажигания движущейся топливной смеси, состоящей из воздуха и 8% углеводородного горючего (бедная смесь) при давлении 127 мм рт. ст. и температуре 300 К при длительности искры 0,2–0,4 мс (заштрихованная площадка).

Таким образом, видно, что лазерное зажигание может применяться при скорости перемещения поверхности ТМГ относительно лазерного фокуса (с учётом вращения ТМГ) до 25 м/с.

**Библиография**

- 1 Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменно-энергетические технологии топливоиспользования. Т. 1. Новосибирск, «Наука», Сибирское предприятие РАН, 1998.
- 2 Бурдаков В.П., Ягодин В.В. Экспериментальное моделирование процесса воспламенения твердого горючего в окислительной среде. Часть 3. // «Наука и технологии в промышленности». 2009, № 4. С. 37–45.
- 3 Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалов И.В., Бородачёв В.Я., Волынский М.С., Прудников А.Г. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1964. 527 с.
- 4 Вопросы зажигания и стабилизации пламени. Сб. статей под ред. С.А. Гольденберга. М.: Изд-во иностр. лит. 1963. 392 с.