



- 2 Басиев Т. Т., Гаврилов А. В., Сметанин С. Н., Федин А. В. Повышение эффективности генерации ИАГ: Nd-лазера с самообращением волнового фронта излучения // Докл. РАН. 2006. 408, № 5. С. 614–617.
- 3 Fedin A. V., Gavrilov A. V., Basiev T. T., Antipov O. L., Kuzhelev A. S., Smetanin S. N. Op. cit.
- 4 Бельдюгин И. М., Беренберг В. А., Васильев А. В. [и др.]. Твердотельные лазеры с самонакачивающимися ОВФ-зеркалами в активной среде // Квантовая электроника. 1989. 16, № 6. С. 1142–1145 ; Федин А. В., Басиев Т. Т., Гаврилов А. В., Сметанин С. Н. Одномодовый ИАГ: Nd-лазер с самообращением волнового фронта и его применение // Изв. РАН. Сер. физическая. 1999. 63, № 10. С.1909–1913.
- 5 Басиев Т. Т., Гаврилов А. В., Осико В. В., Сметанин С. Н., Федин А. В. Исследование дифракционно-связанной генерации набора лазеров с самонакачивающимися ОВФ-зеркалами на решетках усиления при близкодействующей связи // Квантовая электроника. 2009. 39, № 1. С. 31–35.
- 6 Басиев Т. Т., Гаврилов А. В., Ериков М. Н. [и др.]. Петлевые лазерные резонаторы на самонакачивающихся ОВФ-зеркалах в слабо усиливающих активных средах для сфазированных многоканальных лазерных систем // Квантовая электроника. 2011. 41, № 3. С. 207–211.

УДК 343.98

## ТЕПЛОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕЗДЕТОНАЦИОННОГО ПОДРЫВА ОБОЛОЧЕЧНОГО БОЕПРИПАСА

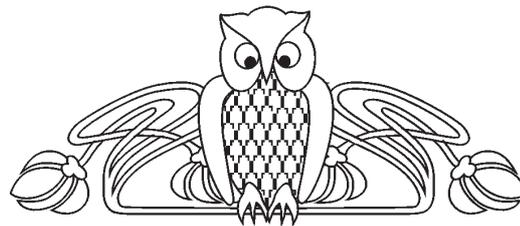
И. В. Шилов, А. В. Федин\*, Ю. М. Скрыбин\*\*

Ковровская государственная технологическая академия им. В. А. Дегтярева

E-mail: shilov\_i\_v@mail.ru

\*E-mail: a.fedin@list.ru

\*\*E-mail: meh-record@yandex.ru



Представлена математическая модель процесса нагрева боеприпаса через оболочку, инициирования реакции горения и оценки возможности разрушения оболочки до достижения критических параметров детонации заряда. Нагрев производится лазерной системой.

**Ключевые слова:** математическая модель, лазер, детонация взрывчатых веществ, обезвреживание взрывных устройств.

### Thermal Mathematical Model of the Non-detonation of the Ammunition

I. V. Shilov, A. V. Fedin, Yu. M. Skriabin

Mathematical model of heat through the shell of ammunition, to initiate the combustion reaction and assess the possibility of destruction of the shell to achieve the critical parameters of the detonation of the charge is submitted. Heating of a cover of an explosive is made by laser system.

**Key words:** mathematical model, laser, detonation of explosives, neutralization of explosive devices.

Лазерный метод обезвреживания боеприпасов является одним из наиболее перспективных. Обезвреженные без детонации боеприпасы остаются внешне целыми, что позволяет далее производить криминалистические исследования. Для конструирования соответствующих лазерных систем необходимо знать параметры излучения, обеспечивающие один из бездетонационных режимов удаления взрывчатого вещества.

Для описания процессов нагрева боеприпаса через оболочку, инициирования реакции горения

и оценки возможности разрушения оболочки до достижения критических параметров детонации заряда использована следующая тепловая математическая модель. В ней оболочечный боеприпас представляет слой тротила, покрытого 3 мм стальной оболочкой, которая облучается осесимметричным лазерным лучом.

Для сечения, проходящего через центр осесимметричной зоны лазерного нагрева, нестационарный тепловой процесс описывается двумерным уравнением теплопроводности

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_r(T)\operatorname{grad}T) + Q, \quad (1)$$

где  $\lambda_r$  – теплопроводность;  $\rho$  – плотность материала;  $c$  – теплоемкость;  $T$  – температура;  $t$  – время;  $Q$  – объемная плотность тепловыделения. Данные теплофизические параметры задаются отдельно для оболочки и взрывчатого вещества (ВВ), причем в процессе численного решения учитывается их температурная зависимость. Объемная плотность тепловыделения  $Q$  задается для ВВ в зависимости от температуры нагрева  $T$  в соответствии с законом Арениуса:

$$Q = Q_B K_0 C^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (2)$$

где  $Q_B$  – выделяемая при сгорании ВВ энергия;  $K_0 C^n$  – предэкспоненциальный множитель;  $E$  – энергия активации реакции горения ВВ;  $R$  – универсальная газовая постоянная.



Интенсивность тепловыделения  $q_T$  при поглощении лазерного излучения на поверхности ( $z = 0$ ) учитывается в граничном условии

$$-\lambda_T \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = q_T. \quad (3)$$

Наилучшим образом двумерный осесимметричный тепловой процесс описывается в цилиндрической системе координат (по радиусу  $r$  и глубине  $z$ ):

$$c(T)\rho \frac{\partial F}{\partial t} = \lambda_T(T) \left( \frac{1}{r^2} F - \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \right) + r Q, \quad (4)$$

$$F(r) = rT(r). \quad (5)$$

Здесь  $\lambda_T$  вынесен за знак дифференцирования для линеаризации уравнения (1), а параметрическая подстановка (5) применяется как к исходному уравнению (1), так и к граничным условиям (рис.1).

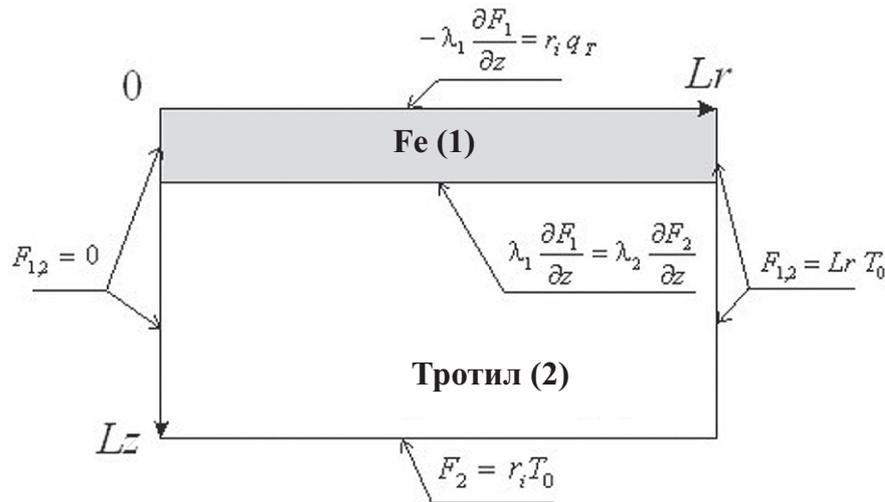


Рис. 1. Задание двуслойной расчетной области и граничных условий для двумерной тепловой задачи в цилиндрических координатах

Дискретизация и численное решение (4) производится в соответствии с методом переменных направлений на конечноразностной расчетной сетке, единой для металла и ВВ. В зоне контакта переход по координате  $z$  от металла с

теплопроводностью  $\lambda_{i,k-1}$  к ВВ с теплопроводностью  $\lambda_{i,k+1}$  осуществляется с помощью конечноразностного выражения, компенсирующего в (4) скачок теплопроводности

$$c_i \rho_i \frac{F_{i,k} - F_{i,k}^{(s-1)}}{\Delta t_k} = \frac{2}{\Delta z_2 + \Delta z_1} \left( \lambda_{i,k+1} \frac{F_{i,k+1} - F_{i,k}}{\Delta z_2} - \lambda_{i,k-1} \frac{F_{i,k} - F_{i,k-1}}{\Delta z_1} \right). \quad (6)$$

Здесь шаги пространственной сетки  $\Delta z_1$  и  $\Delta z_2$  могут быть как различными, так и одинаковыми (для большего порядка точности<sup>1</sup>).

На рис. 2 и 3 представлены результаты моделирования теплового воздействия 10 кВт луча (с длиной волны 1.064 мкм) на образец тротила толщиной 15 мм, покрытого 3 мм стальной оболочкой. Радиус лазерного пятна на поверхности оболочки полагался равным 3 мм, что соответствует дистанционному воздействию волоконного лазера без использования специальных телескопических систем фокусировки. При моделировании использовалась расчетная сетка  $100 \times 360$  узлов (60 узлов в оболочке и 300 в ВВ) по координатам  $r \times z$  с шагом 200 мкм по  $r$  и 50 мкм по  $z$ .

Моделирование показало, что при указанных параметрах лазерного прогрева ВВ через сталь-

ную оболочку поверхность оболочки начинает расплавляться раньше, чем начинается реакция горения ВВ. На момент развития реакции горения, то есть роста температуры в ВВ за счет тепловыделения при горении ВВ (см. рис. 2, б и рис. 3), оболочка расплавлена менее чем на 1 мм, а размеры прогретой до  $T_{\text{peak}}$  зоны (глубина  $\approx 2$  мм, радиус  $\approx 5$  мм) сопоставимы или менее критических размеров ВВ, необходимых для развития детонационной волны ( $d_{\text{кр}} = 3, 9, 16$  мм для молотого, прессованного и литого тротила соответственно<sup>2</sup>).

Заметим, что температура поверхности не достигла температуры кипения, а значит, значительного истончения оболочки за счет выдавливания расплава из зоны воздействия давлением лазерного испарения в данном случае нет (выдавливание расплава модель пока не рассматривает).

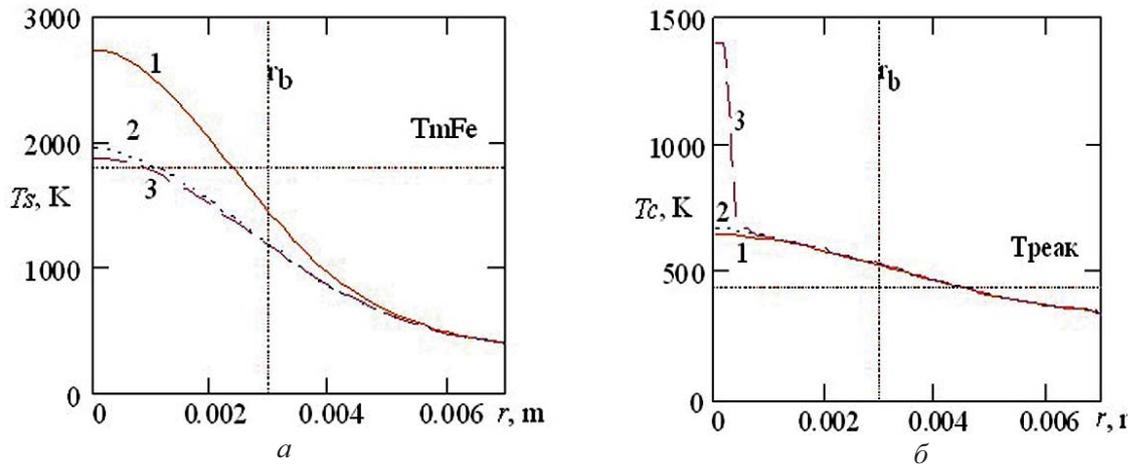


Рис. 2. Распределение температуры  $T$ , К от радиуса  $r$ , м на облучаемой поверхности (а) и на поверхности контакта оболочки с ВВ (б) в моменты времени 0,5 (1), 0,513 (2) и 0,514 (3) с при воздействии 10 кВт луча радиусом  $r_b = 3$  мм. Длительность облучения 0,5 с

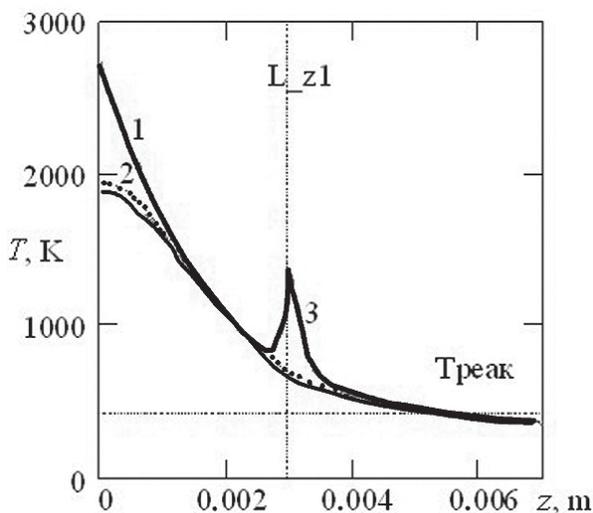


Рис. 3. Распределение температуры  $T$ , К по координате  $z$ , м на оси симметричной зоны лазерного воздействия в моменты времени 0,5 (1), 0,513 (2) и 0,514 (3) с. Мощность луча 10 кВт, радиус  $r_b = 3$  мм, длительность облучения 0,5 с;  $L_{z1}$  – координата контакта оболочки с ВВ;  $T_{reak}$  – температура начала реакции в ВВ

Тогда реакция детонации может произойти быстрее, чем разрушится оболочка. Поэтому предпочтительными являются режимы воздействия более узким и интенсивным лазерным лучом.

Эффективность дистанционной фокусировки лазерного излучения напрямую связана с качеством излучения, которое достигается, прежде всего, при одномодовом режиме генерации. В настоящее время разработан ряд одномодовых волоконных лазеров мощностью 1–5 кВт. При использовании телескопических систем с диаметром апертуры порядка 20 см получить лазерное пятно диаметром 1 мм можно на расстоянии в несколько десятков метров. При этом умень-

шение радиуса луча с 3 до 0,6 мм увеличивает интенсивность в 25 раз. На рис. 4 представлены временные зависимости температуры облучаемой поверхности и зоны контакта оболочки с ВВ на оси зоны нагрева для воздействия 1, 3 и 5 кВт лазерным лучом с диаметром пятна  $d_b = 1,2$  мм.

Результаты моделирования показывают, что даже для уменьшенного лазерного пятна мощности непрерывного излучения 1 кВт недостаточно для инициализации локальной реакции зажигания ВВ. Режим нагрева задолго до окончания воздействия (начиная с 0,3 с) переходит в фазу насыщения, обеспечивая более медленный, но больший по объему нагреваемого ВВ разогрев. Это приведет к объемному тепловому взрыву если не всего заряда боеприпаса, то значительной его части, что может спровоцировать детонацию.

При мощности узкого луча 3 кВт (см. рис. 4, б) ВВ начинает слабо разогреваться с момента времени 0,25 с и после окончания лазерного воздействия остывает без образования вспышки. Температура облучаемой поверхности значительно превышает температуру кипения, то есть луч заглубляется в оболочку, и если к моменту окончания воздействия она будет проплавлена, начнется бездетонационное выжигание ВВ.

При мощности узкого луча 5 кВт (см. рис. 4, в) разогрев ВВ начинается с момента 0,15 с, вспышка (в соответствии только с тепловым расчетом) с момента 0,5 с. При этом с времени воздействия 0,05–0,1 с может начаться заглубление луча в оболочку за счет выдавливания расплава. При известных значениях скорости проплавления стали порядка 0,5–2 м/с за время до начала вспышки 0,3–0,4 с теоретически луч может прошить парогазовым каналом оболочку

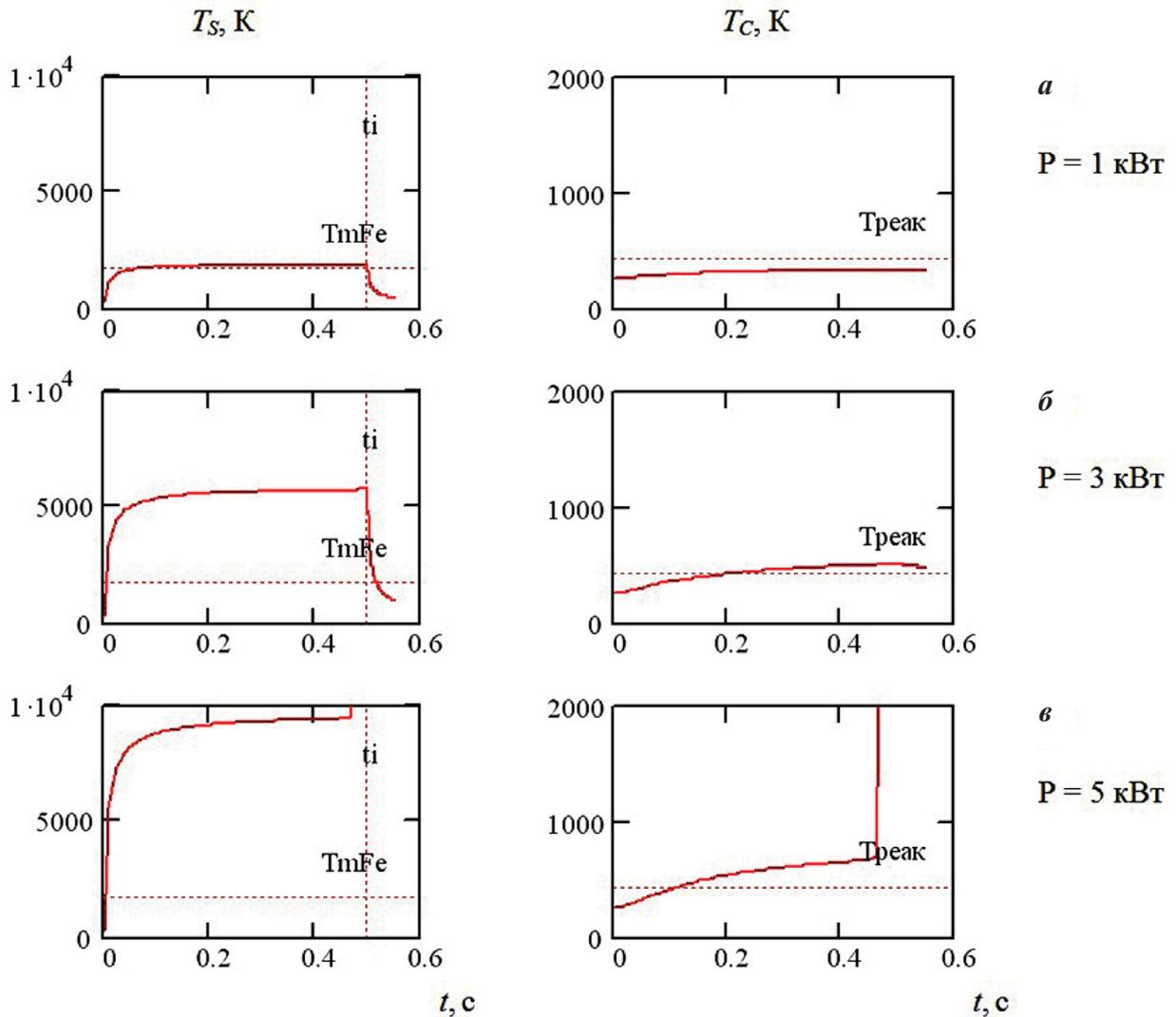


Рис. 4. Зависимость от времени  $t$ , с температуры облучаемой поверхности  $T_S$ , К и зоны контакта оболочки с ВВ  $T_C$  на оси зоны нагрева для воздействия 1, 3 и 5 кВт лазерным лучом с диаметром пятна 1,2 мм. Длина волны излучения 1,064 мкм, профиль распределения интенсивности гауссовый. Длительность облучения 0,5 с

толщиной до 1 см<sup>3</sup>. Однако температурные режимы в формирующемся парогазовом канале заведомо не известны и могут быть значительно ниже результатов, полученных в рамках тепловой модели. Кроме того, давление отдачи пара на уровне единиц и десятков атмосфер формирует за относительно длительное время воздействия (0,3–0,4 с) механический импульс, который может не только разрушить оболочку, но и спровоцировать детонацию ВВ.

Исходя из того, что при моделировании непрерывных режимов лазерного воздействия вариантов, однозначно подходящих для бездетонационного разрушения оболочки, не получено, особый интерес представляет рассмотрение вариантов воздействия на оболочку сериями (цугами) наносекундных импульсов. При длительности единичных импульсов цуга  $t_i = 20\text{--}100$  нс

и энергии  $W_i = 30\text{--}350$  мДж можно реализовать испарительный режим удаления материала. Преимущество данного способа лазерной прошивки отверстий заключается в сочетании предельно малых размеров зон прогрева оболочки и малых значений импульсов давления на поверхность оболочки. Кроме того, существует возможность реализовать максимально контролируемые и даже адаптивные режимы воздействия (сверления)<sup>4</sup>.

На основе предлагаемой тепловой модели, дополненной моделью процесса образования испарительного канала и моделью образования паро-плазменного потока продуктов разрушения<sup>5</sup>, был проведен ряд численных экспериментов по воздействию на стальную оболочку серии нс-импульсов (сетка 10 мкм по  $r$  и 3 мкм по  $z$ ) (табл.).



**Результаты расчетов воздействия лазерного излучения на стальную оболочку**

Параметры лазерного воздействия	Ts, К (max)	Заглубление за импульс, мкм	Ослабление в плазме
$d_b = 3$ мм; $W_i = 50$ мДж; $t_i = 100$ нс	900	0	–
$d_b = 1$ мм $W_i = 50$ мДж; $t_i = 20$ нс	6800	0,14	1,5% (max)
$d_b = 1$ мм; $W_i = 350$ мДж; $t_i = 100$ нс	12500	1,6	от 5 до 70% (max)
$d_b = 1$ мм; $W_i = 350$ мДж; $t_i = 20$ нс	18000	1,1	от 10 до 95% (max)

Полученные результаты показывают, что при воздействии сфокусированного лазерного луча ( $d_b = 1$  мм) энергии нс-импульсов 50–350 мДж вполне достаточно для постепенного истончения оболочки. При средней энергии цуга 3,5 Дж (количество импульсов в цуге от 10 до 70) и частоте следования импульсов 30 Гц для испарения 3 мм стального слоя потребуется порядка 10 с. Причем глубина прогрева отдельного нс-импульса не превышает 20–30 мкм, что исключает преждевременный поджиг ВВ. На финальной стадии прошивки (оставшиеся 100–200 мкм) возгорание ВВ разрушит оболочку уже без детонации.

Таким образом, впервые с помощью моделирования показано, что использование мощных твердотельных лазеров с высоким качеством излучения, и в первую очередь лазеров, генерирующих излучение в виде цугов нс-импульсов, позволит дистанционно производить вскрытие оболочек боеприпасов без детонации и даже без теплового взрыва.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантом РФФИ (№ 11-08-97543).*

**Примечания**

- 1 См.: Шилов И. В., Федин А. В. Тепловые процессы в материалах, индуцированные высокоинтенсивным лазерным излучением : монография. Ковров, 2010.
- 2 См.: Беляев А. Ф. [и др.]. Переход горения конденсированных веществ во взрыв. М., 1973.
- 3 См.: Каюков С. В. Расширение возможностей импульсных YAG-лазеров миллисекундного диапазона длительности в технологии сварки // Квантовая электроника. М., 2000. Т. 30, № 11. С. 941–948.
- 4 См.: Басиев Т. Т. [и др.] Лазерные системы с пассивной модуляцией добротности для прецизионных технологий // Известия РАН. Сер. Физика. 2001. № 6. С. 914–919 ; Басиев Т. Т. [и др.]. Лазерная прошивка сверхглубоких микронных отверстий в различных материалах при программируемом управлении параметрами лазерной генерации // Квантовая электроника. 2007. Вып. 37, № 1. С. 99–102.
- 5 Шилов И. В., Гаврилов А. В., Федин А. В. Математическое моделирование тепловых и оптических параметров зоны лазерного воздействия для определения параметров обратной связи системы адаптивной прецизионной лазерной обработки материалов : материалы 1-й Междунар. Российско-Китайской конф. 23–28 сентября 2011 г., Суздаль. Владимир, 2011. С. 94.

УДК 343.98

**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ЧАСТЕЙ ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ**

**Д. С. Коровкин**

Санкт-Петербургский университет МВД России  
E-mail: korovkinds@mail.ru

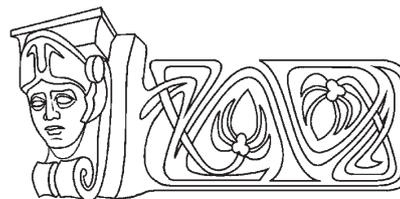
В статье отмечено, что актуальной задачей является разработка криминалистических требований и критериев, которым должны удовлетворять основные части огнестрельного оружия. Показано, что состояние данных деталей должно быть таковым, чтобы они обеспечивали производство выстрела и нормальное взаимодействие с иными деталями конкретной модели.

**Ключевые слова:** огнестрельное оружие, части огнестрельного оружия, стреляющее устройство, экспертиза.

**Problematic Issues of Forensic Study of the Basic Parts of Firearms**

**D. S. Korovkin**

In the article shown that the actual task is to develop a forensic requirements and criteria which should satisfy the basic parts of fire-



arms. Was shown that the condition of these parts should be such that they ensure the production of shot and normal interaction with other details of a particular model.

**Key words:** firearms, parts of firearms, shooting device, expertise.

С момента вступления в силу Федерального закона от 13 ноября 1996 г. № 150-ФЗ «Об оружии» в российском законодательстве появилось определение основных частей огнестрельного оружия, под которыми законодатель предлагает понимать ствол, затвор, барабан, рамку, ствольную коробку. Федеральный закон от 25 июня 1998 г. № 92-ФЗ «О внесении изменений и дополнений в Уголовный кодекс Российской Феде-