

6. Рекомендации по определению прочностных и деформативных характеристик бетона при одноосных напряженных состояниях. М: НИИЖБ Госстроя СССР, 1985.

7. Bazant Z. P., Tsubaxi I. Total strain theory and path-dependence of concrete // J. Eng. Mech. Div., ASCE. 1980. Vol. 106(6). P. 1151–1173.

8. Kupfer H. Hilsdorf H.K. Rusch H. Behavior of concrete under biaxial stress // J. Am. Concr. Inst ACI. 1969. Vol. 66, N 2. P. 656–666.

## **ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ПРОНИКАНИЕ СТЕРЖНЕВОГО УДАРНИКА В ГРАНИТ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПО МЕТОДИКАМ ЭГАК И ТИМ**

*А. В. Городничев<sup>1,2</sup>, В. В. Залесский<sup>1</sup>, А. Г. Иоилев<sup>1,2</sup>, С. А. Капинос<sup>1</sup>, Ю. В. Кочнев<sup>1</sup>,  
А. А. Краюхин<sup>1</sup>, Н. В. Лапичев<sup>1</sup>, В. Н. Мотлохов<sup>1</sup>, О. Н. Пронина<sup>1</sup>, И. В. Рыжов<sup>1</sup>,  
А. В. Сальников<sup>1</sup>, С. С. Соколов<sup>1</sup>, Т. И. Чайка<sup>1</sup>, Ю. В. Янилкин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров,

<sup>2</sup>СарФТИ НИЯУ «МИФИ», г. Саров

Численное моделирование занимает важное место при изучении явлений высокоскоростного удара и взрыва в скальном грунте. Это необходимо для прогнозирования механического действия промышленных взрывов, исследования кратерообразования при падении крупных метеоритов и т. д. Для получения достоверных результатов расчетов необходимо применять адекватные физические модели изучаемых сред и проводить их всестороннюю верификацию и валидацию в используемых численных методиках. В литературе весьма немного моделей скальных грунтов, которые успешно используются для моделирования задач как взрыва, так и удара. В первую очередь, это связано с многообразием и сложностью процессов, происходящих при динамическом нагружении скального грунта, а также большому разбросу его механических характеристик. Из зарубежных моделей можно отметить модель разрушения скального грунта [1], разработанную в LLNL, с помощью которой авторы успешно описывали в расчетах как камуфлетные ядерные взрывы, так и лабораторные эксперименты по взрывам в граните. Они также использовали эту модель для численного решения задач проникания в скальный грунт [2]. Из отечественных моделей, на наш взгляд, наибольший интерес представляет собой обобщенная квазиупругопластическая (ОКУП) модель деформирования и разрушения скального грунта [3], разработанная в ЦФТИ МО РФ для численного моделирования поведения скального грунта под действием взрывной нагрузки с амплитудой до  $P \leq 10$  ГПа [4]. Нами была предложена модификация ОКУП модели [5]: при вычислении среднего размера фрагмента при сдвиговом разрушении вместо эмпирической зависимости размера фрагмента при взрывном разрушении использовать модель хрупкого разрушения Грейди [6]. Это позволило расширить класс решаемых с помощью ОКУП модели задач и проводить расчеты как взрыва, так и удара, и проникания. В работе [5] также приведены результаты валидационных расчетов, проведенных с помощью методики ЭГАК [7] на эйлеровой сетке с использованием модифицированной ОКУП модели. В дальнейшем модифицированная ОКУП модель была введена в методику ТИМ [8], предназначенную для проведения расчетов на неструктурированной лагранжевой сетке. Ниже приведены результаты валидационного эксперимента по высокоскоростному прониканию стержневого металлического ударника в гранитную мишень и проведенных по методикам ЭГАК и ТИМ валидационных расчетов.

В опыте по прониканию стержневого ударника в мишень из гранита, при практически нормальном ударе со скоростью  $V_0 = 3,27$  км/с, преграда представляла собой гранитный блок длиной  $\sim 30$  см, шириной  $\sim 9$  см (в направлении рентгенографирования), высотой  $\sim 20$  см. Ударник состоял из стержня из ВНЖ (диаметр 4 мм, длина 30 мм) и хвостовой стабилизирующей юбки из дюралюминия (диаметр 9,5 мм, длина цилиндрической части 6 мм); масса ударника  $M = 8$  г. Фотография ударника приведена на рис. 1.

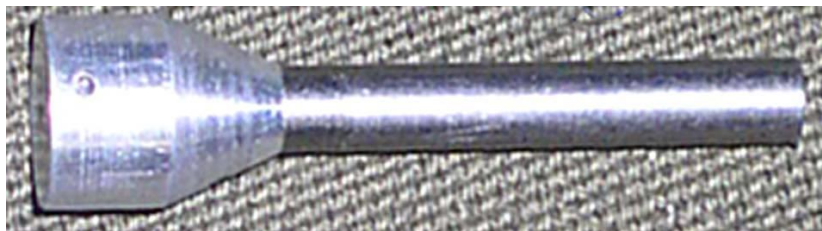
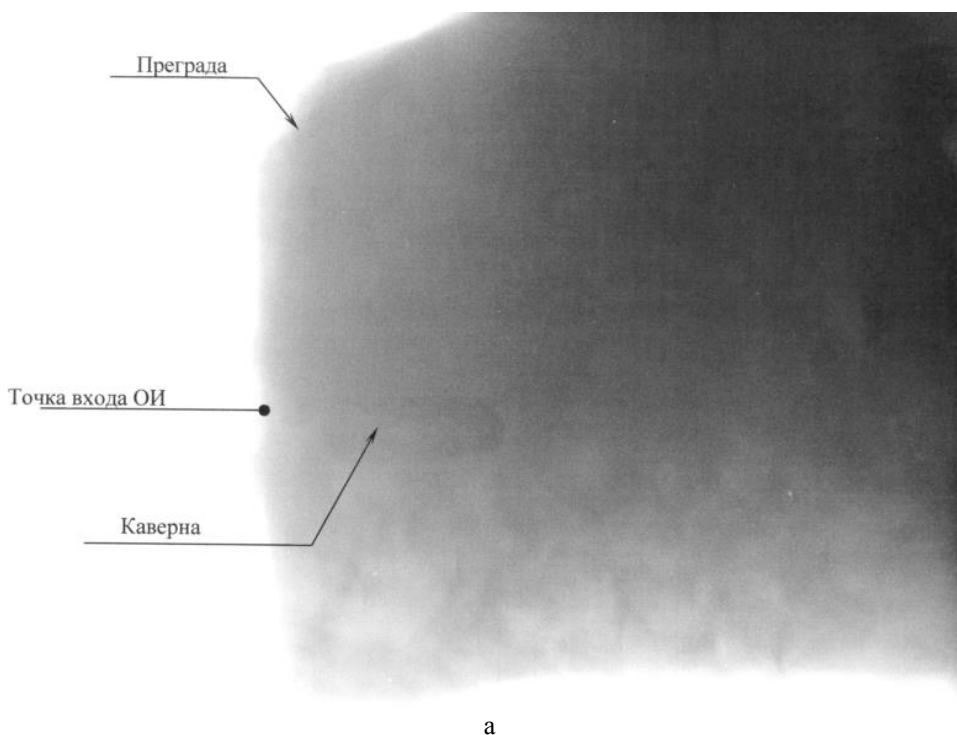


Рис. 1. Фотография ударника

Ударник в поддоне разогнался в стволе легкогазовой баллистической установки ЛГУ-16 [9], после вылета из ствола ЛГУ поддон отсекался. Углы тангажа ( $+5^\circ$ ) и рыскания ( $-3^\circ$ ) ударника определялись с помощью двух ортогонально расположенных рентгеновских аппаратов на расстоянии  $\sim 1$  м до лицевой поверхности преграды. Скорость ударника определялась с использованием электроконтактной методики регистрации с погрешностью  $< 5\%$ . В процессе проникания производилось рентгенографирование преграды и ударника. По рентгенограмме на момент времени  $t_p = 23,75$  мкс от момента удара был определен профиль каверны (рис. 2). На момент рентгенографирования длина стержня составила 6 мм, глубина и средний диаметр каверны 54 и 12 мм.



а

Рис. 2. Результаты опыта: а – рентгенограмма на момент времени  $t_p = 23,75$  мкс; б – профиль каверны по результатам обработки рентгенографического снимка (между точками 2 и 3 и 19 и 20 границы каверны не видны). Окончание рисунка на с. 186

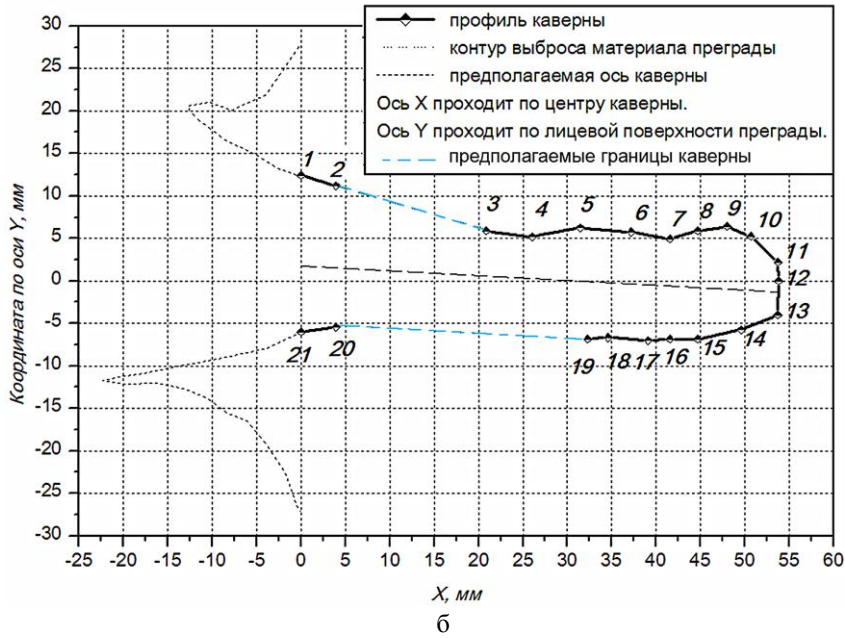
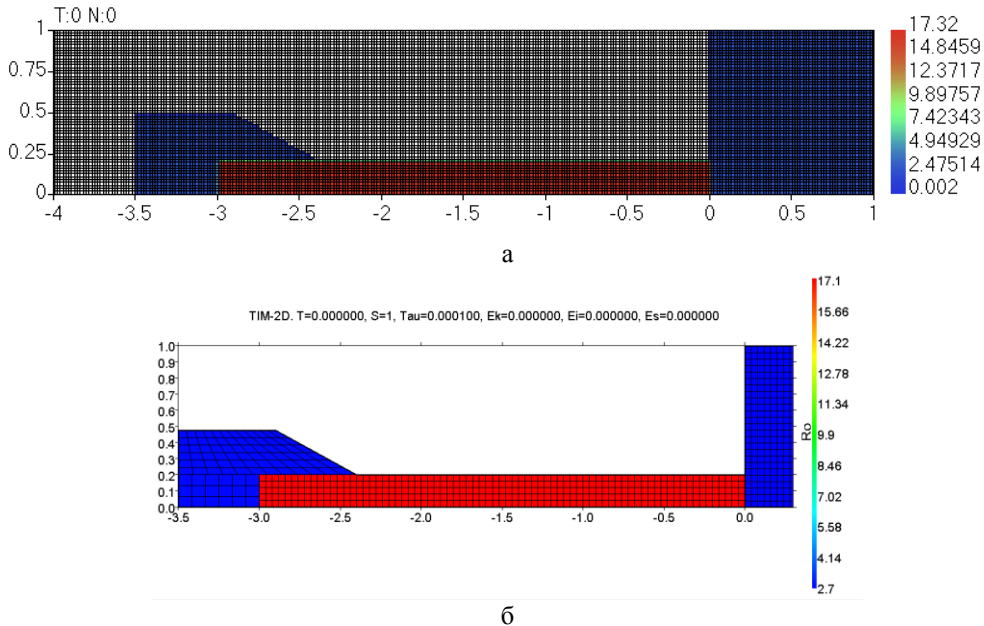


Рис. 2. Окончание

Численное моделирование опыта проводилось в двумерной осесимметричной постановке. Расчеты по методике ТИМ проводились на лагранжевой многоугольной неструктурированной счетной сетке, расчеты по методике ЭГАК – на эйлеровой равномерной квадратной счетной сетке. Размер ячейки выбирался так, чтобы на радиус ударника приходилось  $N = 5, 10, 12, 20$  или 40 счетных ячеек.

В расчетах гранитная мишень представляла собой цилиндр высотой 10 см и радиусом 5 см. В начальный момент времени мишень покоилась, а ударник налетал на нее со скоростью  $V_0 = 3,27$  км/с. На границах ударника и мишени задавались условия типа «свободная поверхность». Расчеты проводились до момента времени сравнения с рентгенограммой  $t = 23,75$  мкс. На рис. 3 приведен фрагмент начальной геометрии (ударник и прилегающая часть мишени) со счетной сеткой.

Рис. 3. Начальная геометрия (фрагмент) и счетная сетка: а – расчет ЭГАК ( $N = 10$ ); б – расчет ТИМ ( $N = 5$ )

Для описания поведения ударного сжатия материалов ударника применялось уравнение состояния (УРС) Ми – Грюнайзена с постоянным коэффициентом Грюнайзена  $\Gamma$  [10] и аппроксимацией «холодной» части, предложенной Мурнаганом [11]. Для описания сдвиговых свойств дюралюминия использовалась модель идеально-упругопластического тела, ВНЖ – модель Джонсона – Кука [12]. Значения параметров моделей материалов приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметры УРС и модели разрушения

Материал	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$c_0$ , км/с	$n$	$\Gamma$	$P_{отк}$ , ГПа
Дюралюминий	2,78	5,385	3,2	0,9	-1,61
ВНЖ	17,1	3,77	4,8	1,1	-1,17

Таблица 2

Параметры моделей упругопластичности

Материал	$Y_0$ , ГПа	$b$ , ГПа	$k$	$c$	$m$	$C_v$ , кДж/(г · К)	$T_m$ , К	$G$ , ГПа	$\nu$
Дюралюминий	0,5	–	–	–	–	–	–	26,6	0,351
ВНЖ	1,506	0,177	0,12	0,016	1	$134 \cdot 10^{-6}$	1723	160	0,23

Для описания гранита в расчетах использовалась ОКУП модель деформирования и разрушения скального грунта. Сначала параметры ОКУП модели были вычислены по стандартному алгоритму, рекомендованному разработчиками ОКУП модели для расчетов крупномасштабных взрывов в скальном грунте [3], а затем скорректированы для получения согласия результатов, проведенных с помощью программного комплекса ЭГАК расчетов с экспериментальными данными работ по прониканию компактных ударников в мишени из гранита. Стандартный и модифицированный для расчетов задач проникания наборы параметров для гранита (отличающиеся значения выделены жирным шрифтом) приведены в табл. 3.

Расчеты на подробной сетке по методике ТИМ велись на 176 процессорах, в расчете с  $N = 5$  было 6075 счетных ячеек, в расчете с  $N = 12$  было 22480 счетных ячеек. Расчеты по методике ЭГАК велись на 12 процессорах, в расчете с  $N = 10$  было 218400 счетных ячеек.

На рис. 4 приведены расчетные поля плотности на момент времени  $t = 23,75$  мкс и наложенный на них профиль каверны, определенный по рентгенограмме. Глубина и поперечные размеры каверны в расчетах хорошо согласуются с опытными значениями, исключение составляет лишь профиль каверны около лицевой поверхности мишени: в опыте он смещен вверх на  $\sim 0,2$  см относительно расчетного (или относительно оси симметрии), но диаметры каверн в обоих случаях близки друг к другу. Данное отличие связано с тем, что в опыте при ударе стержень в этой плоскости имел угол рысканья  $-3^\circ$ , из-за которого в итоге сформировалась каверна несимметричной формы в рассматриваемой области, а в расчетах моделировался осесимметричный нормальный удар.

Таблица 3

## Параметры ОКУП модели для гранита

Параметр	Стандартный набор	Модифицированный набор
$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	2,7	2,7
$G_d$ , ГПа	30,45	30,45
$G_{st}$ , ГПа	26,55	26,55
$G_{id}$ , ГПа	31,95	31,95
$E_{ss}$ , ГПа	-0,0085	-0,0085
$K_d^0$ , ГПа	51,11	51,11
$K_{st}^0$ , ГПа	44,91	44,91
$K_{id}^0$ , ГПа	55,12	55,12
$\beta$	0,5	0,5
$\chi_1$	2	2
$\tau_p$ , 10 мкс	0,1	0,1
$m$	3	3
$P^*$ , ГПа	1	1
$\varepsilon_{00}$	-0,05	-0,05
$K_{00}$ , ГПа	10,3	10,3
$P_e$ , ГПа	3	3
$\Lambda_0$	1,088	1,088
$Y_{02}$ , ГПа	0,0005	<b>0,01</b>
$Y_{PL}$ , ГПа	2	<b>3</b>
$\mu_2$	0,405	<b>0,609</b>
$c_l$ , км/с	5,84	5,84
$P_S$ , ГПа	-0,0085	<b>-0,06</b>
$P_0$ , ГПа	$10^{-4}$	$10^{-4}$
$K_C$ , ГПа · см <sup>1/2</sup>	0,0116	0,0116
$\chi_3$	2	2
$Y_{01}$ , ГПа	0,115	<b>0,25</b>
$\mu_1$	0,405	<b>1,25</b>

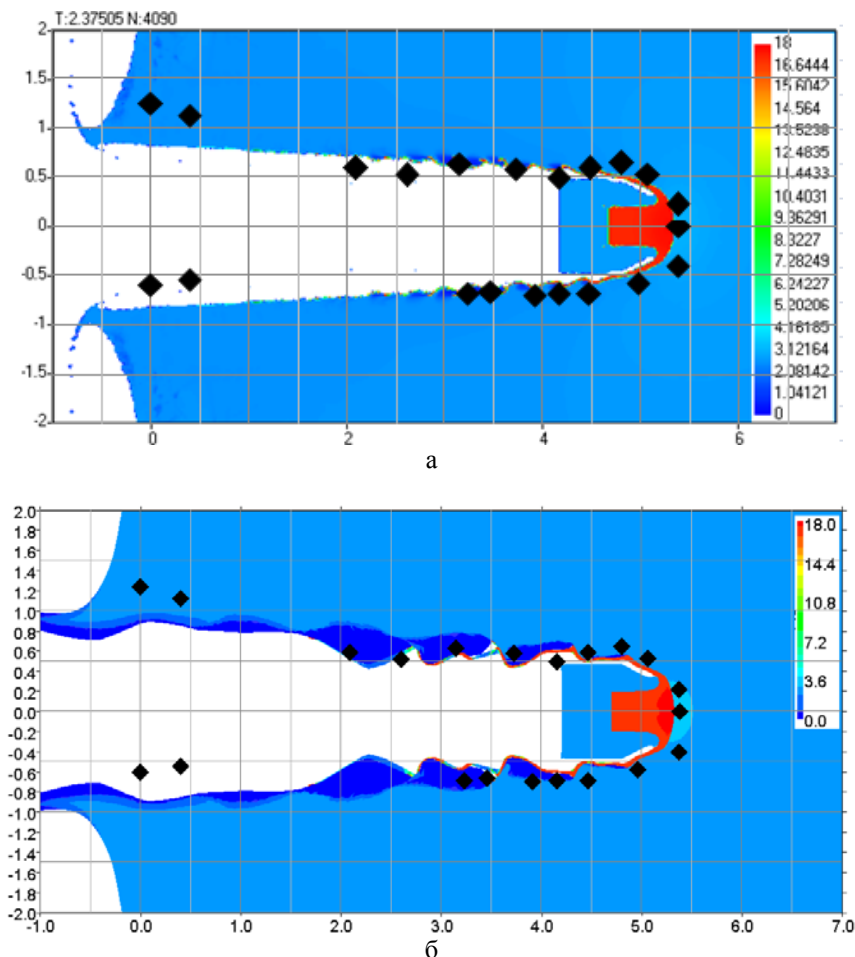


Рис. 4. Форма каверны на момент времени  $t = 23,75$  мкс в опыте (точки) и поле плотности в расчетах: а – расчет ЭГАК ( $N = 20$ ); б – расчет ТИМ ( $N = 20$ )

Во всех расчетах остаток стержня практически полностью закрыт дюралюминиевой аэродинамической юбкой. Это согласуется с данными эксперимента: на рентгенограмме можно различить лишь остаток хвостовой части ударника.

Отметим, что во всех расчетах ТИМ получена гофрированная граница каверны, вызванная «размазыванием» по ней порций материала стержня (ВНЖ). В расчетах ЭГАК, в которых граница каверны описывается с помощью смешанных ячеек, этот эффект проявился только на самой подробной сетке ( $N = 20$ ). На основные размеры каверны (т. е. границу плотного материала) этот эффект особого влияния не оказывает.

В табл. 4 приведены полученные в опыте и в расчетах на момент времени рентгенографирования  $t = 23,75$  мкс длина остатка стержня  $L$  и геометрические параметры каверны: глубина  $H_c$ , диаметр  $D_c(x = 0)$  в сечении лицевой поверхности мишени и диаметр  $D_c(x = 4,2 \text{ см})$  в сечении непосредственно за дюралюминиевой аэродинамической юбкой. Расчетные радиусы каверны в сечениях  $x = 0$  и  $4,2 \text{ см}$  определены по поперечным профилям плотности в граните как координаты с  $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$ . Волнистая поверхность каверны в расчетах ТИМ привела к немонотонной зависимости  $D_c$  от подробности счетной сетки.

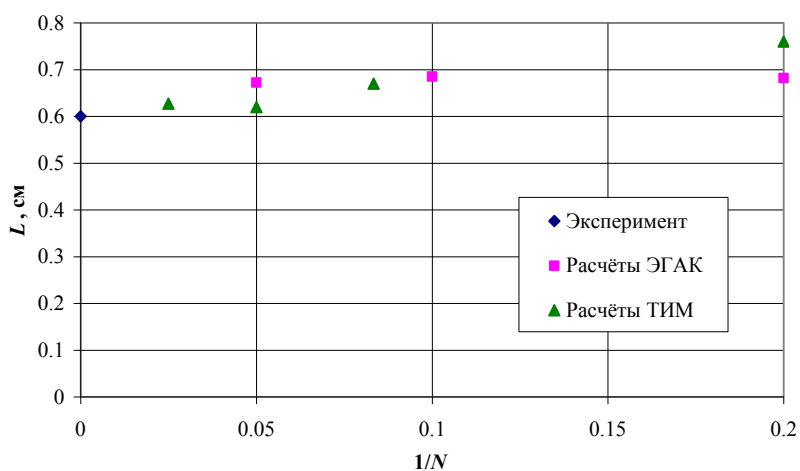
Сходимость по счетной сетке характеризуют приведенные на рис. 5 зависимости длины остатка стержня и геометрических параметров каверны от  $1/N$ . В расчетах ТИМ при  $N \geq 10$  отличие расчетных размеров от измеренных в опыте находится в пределах 1 мм по  $L$  ( $<4\%$  по сработавшей части стержня  $L_0 - L$ ), 1 мм по  $H_c$  ( $<2\%$ ) и в пределах 2,5 мм по  $D_c$  (15–20%). Результаты всех трех расчетов ЭГАК по  $L$  и  $H_c$  практически не отличаются друг от друга.

Таблица 4

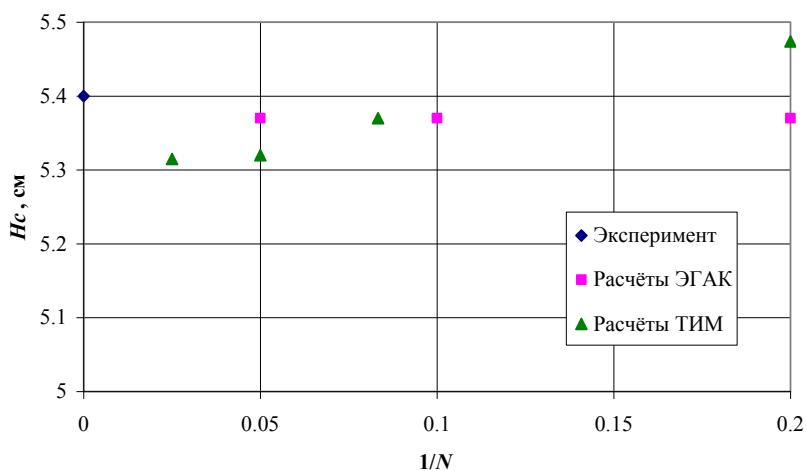
## Результаты опыта и расчетов

Опыт или расчет	$L$ , см	$H_c$ , см	$D_c(x=0)$ , см	$D_c(x=4,2\text{ см})$ , см
Опыт	~0,6	5,4	1,846	1,179*
Расчет ЭГАК ( $N=5$ )	0,682	5,37	1,6	1,28
Расчет ТИМ ( $N=5$ )	0,76	5,474	1,5	1,17
Расчет ЭГАК ( $N=10$ )	0,685	5,37	1,66	1,2
Расчет ТИМ ( $N=12$ )	0,67	5,37	1,61	1,44
Расчет ЭГАК ( $N=20$ )	0,672	5,37	1,66	1,3
Расчет ТИМ ( $N=20$ )	0,62	5,32	1,82	1,25
Расчет ТИМ ( $N=40$ )	0,627	5,315	1,928	1,244

Примечание. \* Диаметр каверны на расстоянии  $x = 4,157$  см от лицевой поверхности мишени.



а



б

Рис. 5. Зависимость результатов расчетов от подробности счетной сетки: а – длина остатка стержня; б – глубина каверны; в – диаметр каверны в сечении лицевой поверхности мишени. Окончание рисунка на с. 191

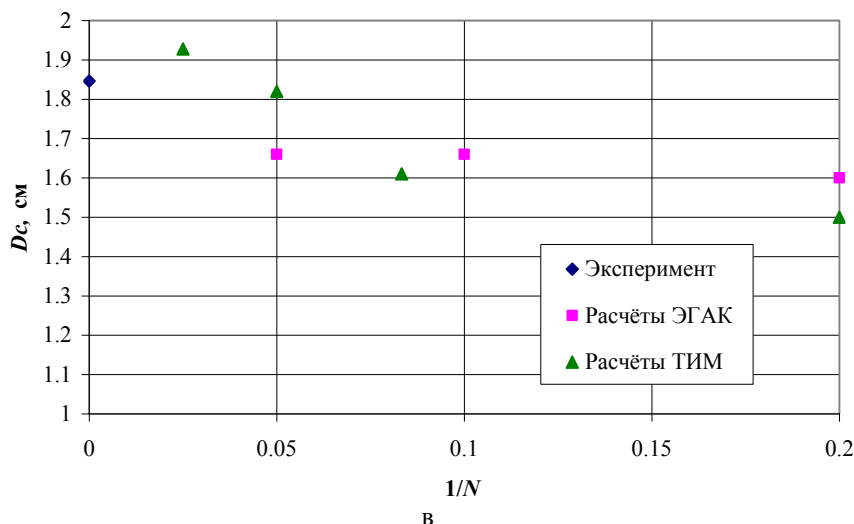


Рис. 5. Окончание

Основные результаты проведенного исследования следующие:

1. В валидационном эксперименте проведена рентгеновская регистрация ударника из ВНЖ и каверны в мишени из гранита в процессе высокоскоростного проникания.
2. Модифицированная ОКУП модель разрушения и деформирования скального грунта с вычислением среднего размера фрагмента при сдвиговом разрушении по модели Грейди позволяет проводить численное моделирование задач проникания в скальный грунт.
3. Модифицированная ОКУП модель реализована в параллельных методиках ЭГАК и ТИМ. В валидационных расчетах на эйлеровой и лагранжевой сетках получено хорошее соответствие экспериментальным данным по высокоскоростному прониканию стержневого ударника в мишень из гранита.

## Литература

1. Simulation of an underground explosion in granite: Preprint / LLNL; T. H. Antoun, O. Y. Vorobiev, I. N. Lomov, L. A. Glenn; UCRL-JC-134523 Rev. 1. Livermore, 1999. [Electronic resource]. Mode of access: <http://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/235748.pdf>.
2. Antoun T. H., Lomov I. N., Glenn L. A. Simulation of the penetration of a sequence of bombs into granitic rock // *Int. J. Impact Engng.* 2003. Vol. 29. P. 81–94.
3. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. М.: Наука, 1990.
4. Физика ядерного взрыва. Т. 1. Развитие взрыва / Под ред. В. М. Лоборева. М.: Изд-во ЦФТИ МО РФ, 2000.
5. Городничев А. В., Краюхин А. А., Иоилев А. Г. и др. Численное моделирование высокоскоростного удара и взрыва в скальном грунте в методике ЭГАК / Под ред. Р. М. Шагалиева // Труды XIV Международ. конф. «Супервычисления и математическое моделирование». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 203–208.
6. Grady D. E. The spall strength of condensed matter // *J. Mech. Phys. Solids.* 1988. Vol. 36. P. 353–384.
7. Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Городничев А. В. и др. Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраивающейся дробной счетной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 1. С. 20–28.
8. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Там же. 2006. Вып. 4. С. 29–44.



9. Бохан А. С., Куликов С. В., Лапичев Н. В. и др. Опыт обработки высокоскоростного метания стальных сферических элементов из ЛГУ // Воздействие мощных потоков энергии на вещество. М.: ИВТАН, 1992. С. 156–163.
10. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
11. Murnaghan F. D. Finite Deformation of Elastic Solid. NY, 1951.
12. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. VII Int. Symp. Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1983. P. 541–547.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА ПРИ ВЗРЫВЕ ПЛАСТИНЫ ВВ ПО МЕТОДИКАМ ЭГАК И ТИМ

*А. В. Городничев<sup>1,2</sup>, А. Г. Иошлев<sup>1,2</sup>, А. А. Краюхин<sup>1</sup>, В. Н. Мотлохов<sup>1</sup>,  
О. Н. Пронина<sup>1</sup>, С. С. Соколов<sup>1</sup>, Т. И. Чайка<sup>1</sup>, Ю. В. Янилкин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров,

<sup>2</sup>СарФТИ НИЯУ «МИФИ», г. Саров

Важное место при изучении взрывных явлений занимает численное моделирование. Оно необходимо для прогнозирования механического действия промышленных взрывов, расчета развития воронки или каверны, распространения ударной и сейсмической волн. К мягким грунтам относят сильнотрещиноватые слабые породы с коэффициентом крепости до 1 как естественного сложения, так и насыпные: песок, глина, суглинок, аллювий, мергель и т. п., а также гравий и щебень [1, 2].

Сложность расчета распространения волн в мягком грунте связана с необходимостью применения сложных математических моделей динамического деформирования с большим количеством параметров. В качестве такой модели в настоящей работе выбрана упругопластическая релаксационная модель динамического деформирования мягкого грунта [2]. Подбор параметров модели обычно осуществляется на основании сравнения характеризующих взрывную волну физических величин, измеренных в опытах, проведенных в лабораторных и полевых условиях, и полученных в сериях одномерных расчетов, соответствующих по постановке экспериментам [2].

Упругопластическая релаксационная модель динамического деформирования мягкого грунта в 2003 году была введена нами в методику ЭГАК [3], предназначенную для проведения расчетов на эйлеровой сетке, и методику ТИМ [4], предназначенную для проведения расчетов на неструктурированной лагранжевой сетке.

В данной работе представлены результаты проведенных по методикам ЭГАК и ТИМ валидационных расчетов задачи о распространении взрывной волны и образовании взрывной полости в песке при взрыве, расположенной внутри массива грунта тонкой пластины химического ВВ. Для описания поведения песка в расчетах использовалась упругопластическая релаксационная модель деформирования мягкого грунта, для описания процесса взрывчатого превращения ВВ в ПВ и дальнейшего поведения ПВ использовалось УРС Зубарева [5].