

ВАЛИДАЦИЯ ОБОБЩЕННОЙ КВАЗИУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ В МЕТОДИКЕ ЭГАК-3Д

А. А. Краюхин, А. В. Городничев, А. Г. Иоилев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Уравнения обобщенной квазиупругопластической модели

Обобщенная квазиупругопластическая (ОКУП) модель предназначена для моделирования поведения скального грунта под действием динамической нагрузки с учетом свойств реального грунта (релаксационное поведение неразрушенного грунта, отрывное и сдвиговое разрушения, дилатансионное разрушение и т. д.). Данная модель была разработана и широко использовалась в ЦФТИ МО РФ [2–4] для моделирования механического действия взрыва на грунт. Для удобства применения ОКУП модель имеет блочное строение, где отдельные блоки отвечают за наиболее характерные состояния материала при нагружении

- блок А используется для описания квазиупругого деформирования при неразрушающих нагрузках;
- блок Б используется для описания сдвигового разрушения или пластического течения;
- блок В используется для корректировки напряжений при отрывном разрушении.

В блоке А напряжения вычисляются с помощью формул

$$\frac{d\varepsilon'_{ij}}{dt} - \frac{1}{2G_d} \frac{dS_{ij}}{dt} = \psi_{ij} \left| H_{ij} \left(1 - \frac{1}{\varphi_S} \right) \text{sign}(S_{ij} - S_{ij}^{st}) \right|, \quad (1)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{1}{K_d} \frac{dP}{dt} = \psi |H| \left(1 - \frac{1}{\varphi} \right) \text{sign}(P - P_{st}), \quad (2)$$

$$H_{ij} = \frac{\varepsilon'_{ij} - \varepsilon'_{ij0}}{t - t_0 + \tau_p} - \frac{S_{ij} - S_{ij0}}{t - t_0 + \tau_p} \frac{1}{2G_{id}}, \quad (3)$$

$$H = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{t - t_0 + \tau_p} - \frac{P - P_0}{t - t_0 + \tau_p} \frac{1}{K_{id}},$$

$$\varphi_S = \exp \left(\left| \frac{\sqrt{J_2} - \sqrt{J_2^{st}}}{\sigma_p} \right|^\beta \right), \quad \varphi = \exp \left(\left| \frac{P - P_{st}}{\sigma_p} \right|^\beta \right), \quad (4)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}, \quad J_2^{st} = \frac{1}{2} S_{ij}^{st} S_{ij}^{st}, \quad (5)$$

$$\psi_{ij} = 1 + \chi \left| \frac{\varepsilon'_{ij} - \varepsilon'_{ijst}}{\varepsilon'_{ijd}} \right|, \quad \varepsilon'_{ijst} = \frac{S_{ij}}{2G_{st}}, \quad \varepsilon'_{ijd} = \frac{S_{ij}}{2G_d}, \quad (6)$$

$$\psi = 1 + \chi \left| \frac{\varepsilon - \varepsilon_{st}}{\varepsilon_d} \right|, \quad \varepsilon_{st} = \varepsilon_{st}(P), \quad \varepsilon_d = \varepsilon_d(P), \quad (7)$$

где S_{ij} , ε'_{ij} – компоненты девиаторов тензоров напряжений и деформаций; P – давление; $\varepsilon = 1 - \rho_0/\rho$ – объемная деформация; G_{id} , G_{st} , G_d , K_{id} , K_{st} , K_d – идеальный, статический, динамический модули сдвига и объемного сжатия; φ_S , φ – коэффициенты скорости релаксации; τ_p – характерное время релаксации за ударным фронтом; H_{ij} , H – потенциалы запаздывания; функции ψ_{ij} и ψ симметризуют соотношения (1)–(2) относительно напряжений и деформаций, σ_p – предел прочности на разрыв. Время t_0 – момент времени прихода возмущения с давлением $P > 10^{-4}$ ГПа в ячейку, полученные значения напряжений и деформаций при $t = t_0$ принимаются в качестве начальных значений ε_0 , P_0 , ε'_{ij0} , S_{ij0} . При $t < t_0$ расчет напряжений в ячейке производится в соответствии с уравнениями (1)–(2) с нулевой правой частью, при $t \geq t_0$ используются уравнения в полной форме. Модули сдвига и объемного сжатия в выражениях (1)–(7) определяются дифференцированием уравнений соответствующих диаграмм деформирования. Диаграммы сдвигового деформирования полагаются линейными

$$S_{ij} = 2G\varepsilon'_{ij}, \quad G = \text{const}, \quad (8)$$

где G есть G_{st} , G_d или G_{id} . Диаграммы объемного деформирования в общем случае задаются в виде

$$P = \frac{K_0}{m} \left[(1 - \varepsilon)^{-m} - 1 \right], \quad (9)$$

где K_0 есть K_{st}^0 , K_d^0 или K_{id}^0 , m – параметр аппроксимации.

Уравнение состояния для блока Б включает дифференциальные соотношения для компонент девиатора тензора напряжений и давления

$$\frac{dS_{ij}}{dt} = 2G_d (\dot{\theta}_{ij} - \lambda S_{ij}), \quad (10)$$

$$\frac{dP}{dt} = K \left(\dot{\phi} + \frac{2}{3} \Lambda \lambda Y \right), \quad (11)$$

где $\dot{\theta}_{ij}$ – компоненты девиатора тензора скорости деформаций; λ – коэффициент пластичности ($\lambda = 0$ – если полные сдвиговые деформации только упругие, $\lambda > 0$ – если полные сдвиговые деформации упруго-пластические); Y – предел текучести; $\Lambda = \Lambda(P, \varepsilon)$ – скорость дилатансии; $\dot{\phi}$ – первый инвариант тензора скоростей деформаций; K – модуль объемного сжатия.

Предельное соотношение для компонент девиатора тензора напряжений задается в форме условия Мизеса

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{3} Y^2 (P), \quad (12)$$

где предел текучести Y зависит от давления и изменяется в процессе разрушения

$$Y = \begin{cases} Y_1(P) \\ Y_t(t, P) \\ Y_2(P) \end{cases}, \quad (13)$$

где Y_1 – кривая прочности для грунта в исходном неразрушенном состоянии

$$Y_1(P) = Y_{01} + \frac{\mu_1 P}{1 + \mu_1 P / (Y_{PL} - Y_{01})}, \quad (14)$$

Y_2 – аппроксимация предела текучести для грунта в разрушенном состоянии

$$Y_2(P) = \begin{cases} Y_{02} + \mu_2 P, & P < P_e, \\ Y_1(P), & P \geq P_e, \end{cases} \quad (15)$$

где P_e – давление перехода от хрупкого к пластическому разрушению. Функция Y_t – предел текучести грунта в процессе разрушения

$$Y_t(t, P) = \frac{Y_1 + Y_2}{2} + \frac{Y_1 - Y_2}{2} \sin \left[\frac{\pi}{t_*} \left(t - t_1 + \frac{t_*}{2} \right) \right], \quad (16)$$

при $t_1 < t \leq t_1 + t_*$,

где t_1 – момент времени начала разрушения, t_* – длительность разрушения. Длительность разрушения можно оценить как $t_* = d_f / C_f$, где d_f – средний размер обломка, C_f – скорость распространения трещин или скорость волн Рэлея. В исходной формулировке ОКУП модели параметр d_f вычислялся с помощью эмпирической формулы [4] $d_f = f(r, q)$, построенной на основе анализа размеров фрагментов при камуфлетных взрывах в гранитных массивах. Здесь r – расстояние до центра энерговыделения, q – энергия взрыва. С помощью введения поправочных коэффициентов эту формулу можно использовать для определения спектра фрагментов при наземных и малозаглубленных взрывах. Однако такой подход может оказаться малоэффективным при использовании ОКУП модели для моделирования, например, задач проникания. Авторами настоящей работы предложено для вычисления размера обломков использовать модель хрупкого разрушения Грейди [5], в которой

средний размер фрагментов вычисляется с помощью формулы

$$d_f = \left(\frac{\sqrt{24} K_C}{\rho C_f \dot{\epsilon}} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (17)$$

где ρ – плотность вещества, $\dot{\epsilon}$ – интенсивность скорости деформации, K_C – коэффициент трещиностойкости. В этом случае размер фрагментов, а соответственно и скорость разрушения, будет определяться только интенсивностью нагрузки, что автоматически снимает все вопросы о границах применимости эмпирических формул.

Для корректировки растягивающих напряжений используется подход, рассмотренный в работе [6]. После вычисления нового тензора напряжений определяются главные напряжения, которые сравниваются с откольной прочностью. При реализации разрушения корректируется весь тензор напряжений. Откольная прочность зависит от накопленной ранее поврежденности.

Моделирование камуфлетного взрыва в гранитном массиве

В качестве тестовой была рассмотрена задача о камуфлетном взрыве в гранитном массиве сферического заряда ВВ ТНТ массой 2 г. В расчете использовалось приближение мгновенной объемной детонации заряда ВВ. В [7] отмечается, что для камуфлетных взрывов в грунте справедлив принцип энергетического подобия по $q^{1/3}$, что позволяет сравнивать результаты взрывов с различными значениями q . Поэтому в дальнейшем при сравнении с опытными данными использовались результаты настоящего расчета после соответствующей нормировки. На рис. 1 приведены зависимости массовой скорости от приведенного времени, полученные при ядерном взрыве в гранитном массиве (эксперимент Pile Driver с $q = 56$ кт [8]) и расчете на разном расстоянии от центра энерговыделения. Видно хорошее согласие опыта и расчета. На рис. 2 приведены зависимости максимального значения массовой скорости и приведенного максимального смещения от приведенного расстояния нескольких ядерных взрывов в гранитных массивах [8] и расчете. Видно, что экспериментальные точки имеют достаточно сильный разброс, однако расчетная кривая проходит примерно посередине. На рис. 3 представлено сравнение результатов опытов по взрывам небольших зарядов ВВ в гранитных массивах [9, 10] и расчетных данных. Между ними наблюдается хорошее согласие.

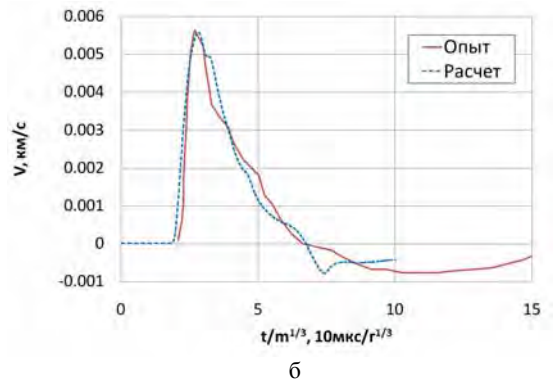
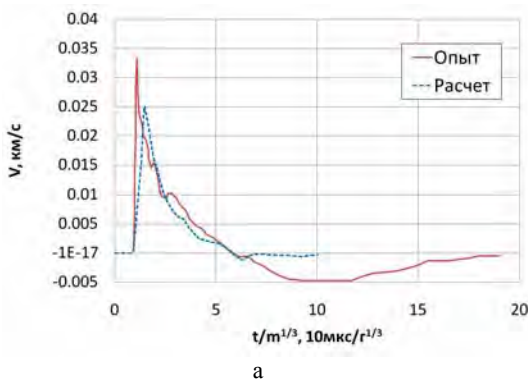


Рис. 1. Зависимости массовой скорости от приведенного времени в эксперименте Pile Driver на расстоянии от центра энерговыделения: а – $H=204$ м; б – $H=470$ м

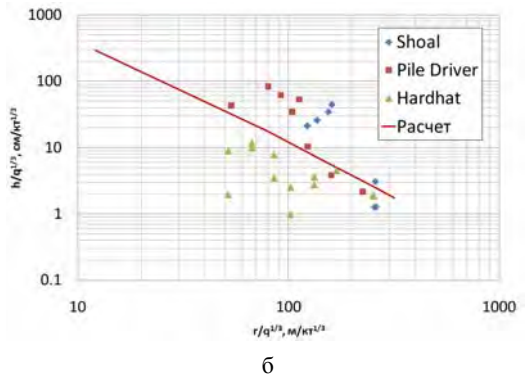
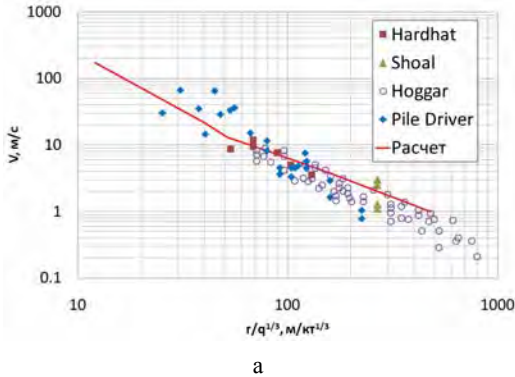


Рис. 2. а – зависимость максимального значения массовой скорости от приведенного расстояния; б – зависимость приведенного максимального смещения от приведенного расстояния

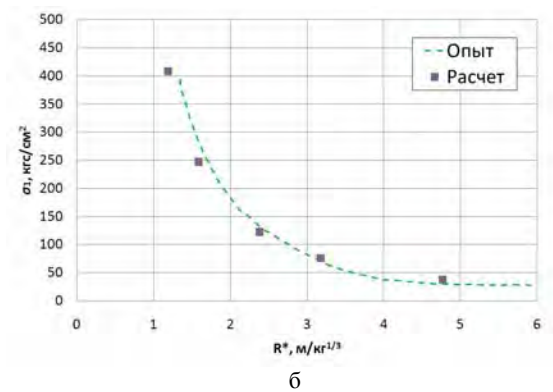
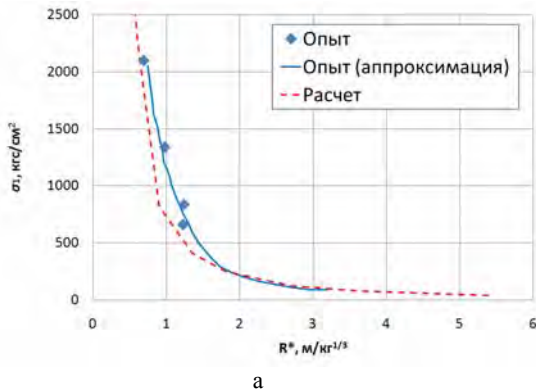


Рис. 3. Зависимость максимального значения радиального напряжения от приведенного расстояния: а – при взрыве 2 г ТЭНа; б – при взрыве 2 г ТНТ

Моделирование высокоскоростного проникания в гранитную мишень

В литературе представлено небольшое количество экспериментальных работ, посвященных прониканию ударников в мишени из гранита. Наиболее подробная постановка и результаты экспериментов изложены в статье [11]. В указанной работе приведены результаты опытов по нормальному прониканию свинцовой пули со скоростью $V_0 = 1,2$ км/с и медного шарика со скоростью $V_0 = 0,69$ км/с в гранитную мишень. После опытов измерялись глубина и диаметр образованного кратера, с помощью ультразву-

ковой томографии определялись размеры области разрушенного материала, а также делался поперечный разрез мишени вдоль оси стрельбы. Характерные особенностями мишени после удара являются наличие кратера конусообразной формы, расположенной под ним области сдвигового разрушения с раздробленным материалом, наличие откольных трещин около свободной поверхности и радиальных трещин в глубине мишени. На рис. 4, 5 приведены поперечные разрезы гранитных мишеней в опытах и расчетах. Наблюдается хорошее качественное и количественное согласие между результатами экспериментов и расчетов.

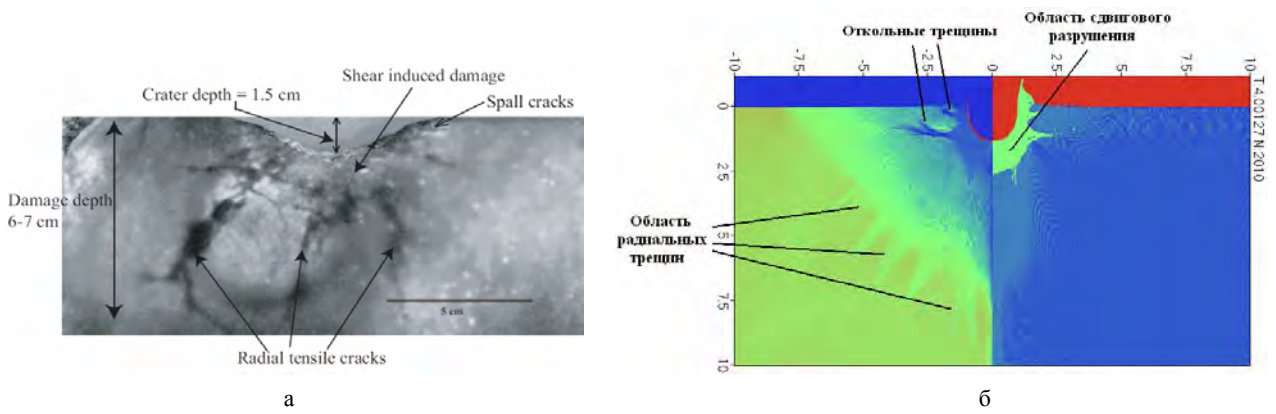


Рис. 4. Поперечный разрез гранитной мишени после удара свинцовой пули со скоростью $V_0 = 1,2$ км/с: а – эксперимент; б – расчет (слева поле плотности, справа поле состояния материала)

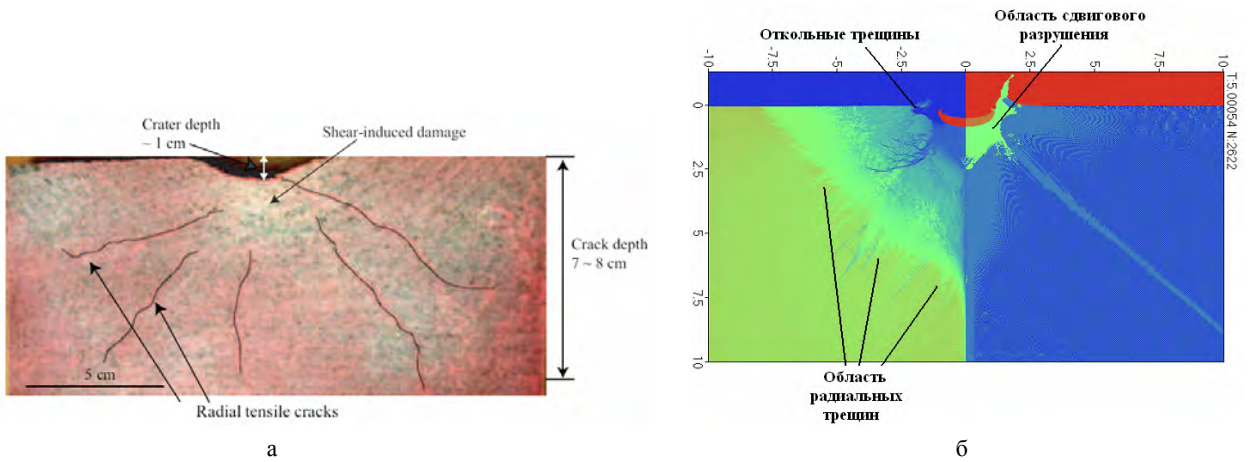


Рис. 5. Поперечный разрез гранитной мишени после удара медного шарика со скоростью $V_0 = 0,69$ км/с: а – эксперимент; б – расчет (слева поле плотности, справа поле состояния материала)

Заключение

В настоящей работе приведены результаты валидации обобщенной квазиупругопластической (ОКУП) модели деформирования и разрушения скального грунта с помощью эйлеровой методики ЭГАК-3D на задачах о камуфлетном взрыве и высокоскоростном ударе. В отличие от исходной формулировки ОКУП модели вместо эмпирической формулы для определения среднего размера фрагментов при сдвиговом разрушении использовалась модель хрупкого разрушения Грейди, в которой размер фрагмента определяется скоростью деформирования. Это позволило расширить область применения ОКУП модели. Проведено численное моделирование камуфлетного взрыва в гранитном массиве и проникания компактного ударника в преграду из гранита. Результаты расчетов показали хорошее согласие с экспериментальными данными. Таким образом, в рамках одной модели удалось описать как взрывные опыты, так и эксперименты по прониканию.

Литература

1. Янилкин Ю. В. и др. Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраиваемой дробной счетной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 1. С. 20–28.
2. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С., Пилипко Ю. В. Квазиупругая модель деформирования скальных грунтов // ДАН. 1982. Т. 264, № 2. С. 326–329.
3. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С., Кривошеев С. Г., Пилипко Ю. В. Модель динамического деформирования и разрушения массивов горных пород // Там же. 1987. Т. 293, № 3. С. 568–571.
4. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. М.: Наука, 1990.
5. Grady D. E. The spall strength of condensed matter // J. Mech. Phys. Solids. 1988. Vol. 36. P. 353–384.
6. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // В сб. «Вычислительные методы в гидродинамике». М.: Мир, 1967.

7. Адушкин В. В., Спивак А. А. Подземные взрывы. М.: Наука, 2007.

8. Antoun T. H., Vorobiev O. Y., Lomov I. N., Glenn L. A. Simulation of an underground explosion in granite // Preprint UCRL-JC-134524 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/235748.pdf>]

9. Ханукаев А. Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. М.: Недра, 1974.

10. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1976.

11. Ai H. A., Ahrens T. J. Simulation of dynamic response of granite: A numerical approach of shock-induced damage beneath impact craters // IJIE. 2006. V. 33. P. 1–10.