

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-4-494-513

СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРУНТОВЫХ СРЕД В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ «ЛОГОС»

© 2025 г.

Дьянов Д.Ю., Дюкина Н.С.,
Котов В.Л., Нагорных Е.В.

Институт теоретической и математической физики Российского
федерального ядерного центра – Всероссийского научно-
исследовательского института экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация

dydyanov@vniief.ru

Поступила в редакцию 23.08.2025

Приведен краткий обзор моделей материалов, применяемых в расчетной практике для прогнозирования поведения геологических сред в условиях высокого и низкого давления, различных видах напряженного состояния при квазистатическом и динамическом, в том числе высокоскоростном, нагружении. Выполнен анализ областей применения моделей геоматериалов, реализованных в программном модуле динамической прочности пакета программ «Логос». Модели условно разделяются на две категории. Особенностью моделей первой категории (грунтовая среда Григоряна и Замышляева – Евтерева) является применение зависимости давления от полной объемной деформации аналогично деформационной теории пластичности. Модели этой категории просты в реализации.

Вторая категория геоматериалов (геологическая модель с «крышкой» Geologic Cap, бетон CSCM, модели FHWA и Мора – Кулона) использует разделение деформаций на упругие и пластические. Для вычисления приращений пластических деформаций применяется поверхность пластического потенциала, ассоциированная или неассоциированная (модель Мора – Кулона) с поверхностью нагружения. Возможен также учет пластического расширения объема (дилатансия), вызванного сдвиговой нагрузкой при низком всестороннем давлении. Форма сдвиговой поверхности нагружения в общем случае включает в себя поверхность отрыва, сдвиговую поверхность разрушения и/или поверхность «крышки» и опциональную зависимость от вида напряженного состояния.

Зависимость давления от объемной деформации в моделях геоматериалов первой группы задается непосредственно пользователем, для второй группы определяется законом пластической сжимаемости для объемной компоненты пластической деформации. Модели второй группы дополнены механизмами кинематического упрочнения (концепция активного и обратного напряжения), вязкопластического поведения (концепция пробных и невязких напряжений), накопления повреждений (концепция эффективных и приведенных напряжений).

Приведены примеры тестовых расчетов на одном конечном элементе в программном модуле динамической прочности пакета программ «Логос»,

демонстрирующие работоспособность алгоритмов: пластичности и учета вида напряженного состояния на модели геоматериала CSCM при растяжении, сжатии и чистом сдвиге; вязкопластичности, поврежденности на модели геоматериала CSCM при сжатии; «крышки», кинематического упрочнения на модели геоматериала Geologic Cap при сжатии; изотропного упрочнения на модели FHWA при сжатии.

Ключевые слова: модели геоматериалов, модель Григоряна, модель Soil and Foam, модель Замышляева – Евтерева, Geologic Cap, CSCM, FHWA, модель Мора – Кулона, пакет программ «Логос».

Введение

Численные модели геологических сред находят применение в различных областях инженерного анализа. Обзор публикаций за последние 15 лет позволил выделить некоторые актуальные направления исследований.

Для моделирования задач удара и проникания жестких и деформируемых ударников в грунтовые среды (влажный и сухой песок, глину, мерзлый грунт и др.) применяется модель Григоряна [1–4] и ее модификации: модель грунтов и пеноматериалов (Soiland Foam) [5], модель Замышляева – Евтерева [6]. К решению задач бурения шнеком грунтов разной степени твердости имеется опыт применения моделей Geologic Cap [7, 8] и CSCM [9, 10]. Другой вариант ударного деформирования – воздействие ледяных торосов на сооружения – реализуется в расчетах с применением моделей Мора – Кулона [11, 12] и CSCM [13]. Условие пластичности Мора – Кулона с ограничением поверхности текучести (условие Мора – Кулона – Треска) успешно применяется также в [4] в составе модели Григоряна для моделирования водонасыщенного грунта при отрицательных температурах (мерзлого песка). Соответствие полученных расчетных данных находится в пределах разброса результатов динамического ударного эксперимента – 15–20% в лабораторных условиях. Высокая интенсивность нагрузки достигается также в задачах взрыва, при решении которых для описания разлета частиц применяется модель FHWA [14–18]. Отмечается ограниченная применимость модели FHWA в задачах формирования кратера: модель показывает завышенную жесткость материала по сравнению с экспериментом [18].

Модели геоматериалов широко применяются в задачах расчета прочности основания сооружений и подземных коммуникаций. Для моделирования подземных транспортных тоннелей [19–21], заглубленных трубопроводов [22, 23] и шахт используются модели Мора – Кулона [24, 25] и FHWA [19–23]. Расчет прочности дорожно-технических сооружений при дорожно-транспортных происшествиях проводится с применением моделей FHWA [26–29], CSCM [30, 31]. Поведение грунта при забивке свай в [32, 33] описывается с помощью модели FHWA, анализ несущей способности и предельных нагрузок гибких песчаных оснований [34], подпорных стенок [35] и плотин [36] выполняется с применением моделей Geologic Cap [34, 35] и Мора – Кулона [36]. В задачах оптимизации агротехники [37–39] и инженерной разработки грунта [7, 21, 40, 41] при необходимости учета разлета частиц при слабых удерживающих давлениях применяется модель FHWA [42–44], а для адекватного описания процесса при значительных сжимающих давлениях – модель Geologic Cap [7, 41, 45, 46]. Модель Geologic Cap также применяется для описания процесса трехосного сжатия образцов из бетона [45, 46], порошка неодимового магнита [47], алюминиевого сплава Alumix 321 PM [48].

1. Краткая характеристика моделей геоматериалов

Анализ публикаций позволяет выделить наиболее распространенные в расчетной практике модели геоматериалов. В таблице 1 представлена информация о рекомендованных в литературе областях применения некоторых моделей.

Таблица 1

Области применения моделей геоматериалов

Модель	Виды грунтов	Область применения	Ссылки
Грунты и пеноматериалы	Связные и сыпучие грунты, глины	Упругая деформация, гидростатическое сжатие	[45, 47]
Грунт Григоряна	Мягкие и мерзлые грунты: пески, супеси, суглинки	Удар и проникание в мягкий сыпучий и связный грунт, распространение ударных волн в грунте	[1–4]
Грунт Замышляева – Евтерева	Мягкие грунты	Распространение сейсмических волн в грунте от удара и подземного взрыва	[6]
Грунт FHWA	Дорожные покрытия, тоннели, грунты сельскохозяйственного назначения	Реакция связных грунтов на взрывное и ударное воздействие в задачах строительства (тоннели, свайные фундаменты, дорожные насыпи), моделирование агротехники	[14–23, 42–44]
Грунт GEOLOGIC CAP	Металлические порошки, сыпучие и связные грунты	Прессование металлических порошков, гидростатическое и трехосное сжатие в геотехнике, проектирование дорожных покрытий, бурение скважин, внедрение индентора в сыпучую грунтовую среду, анализ несущей способности гибких песчаных оснований и подпорных стенок грунтовых насыпей	[7, 8, 34, 35, 45–48]
Бетон CSCM	Горные породы, бетон, камень, лед, влажный песок	Определение несущей способности элементов бетонных и железобетонных конструкций, описание нелинейных свойств деформирования и накопления повреждений грунтов, бетонов, морского льда	[9, 10, 13, 30, 31]
Грунт Мора – Кулона	Горные породы, бетон, камень, соли, лед	Определение несущей способности грунтов, расчетов устойчивости склонов, подпорных стен, взаимодействие гидротехнических сооружений и судов с морским льдом, задачи гидроразрыва и горного дела	[11, 12, 24, 25, 36]

В таблице 2 приведена краткая характеристика моделей геоматериалов, реализованных в модуле динамической прочности пакета программ «Логос» [49], дополненная данными из [8]. Модели могут включать в себя механизмы учета скорости деформации, вида напряженного состояния (НС), упрочнения, сжимаемости и накопления повреждений.

Модели, реализованные в модуле динамической прочности пакета программ

«Логос», можно условно разделить на две категории в зависимости от типа расчета пластической деформации [50].

Таблица 2
Краткая характеристика моделей геоматериалов

Модель геоматериала в пакете программ «Логос»	Скорость деформации	НС	Упрочнение: кинематич. – К, изотропное – И	Поврежденность	Контроль сжимаемости
Грунты и пеноматериалы	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Грунт Григоряна	Нет				
Грунт Замышляева – Евтерева	Да				
Грунт Мора – Кулона	Нет	Да	Нет	Нет	Нет
Грунт FHWA	Да	Да	И	Да	Нет
Грунт Geologic Cap	Нет	Нет	К	Нет	Поверхность «крышки»
Бетон CSCM	Да	Да	К	Да	

Первую категорию моделей геоматериалов составляют, по сути, различные варианты реализации широко известной модели грунтовой среды Григоряна, предложенной академиком С.С. Григоряном в 1960 году. Модель грунтов и пеноматериалов (включая модификацию модели грунтов и пеноматериалов с ограничением по пределу текучести) [51] содержит диаграмму давления от объемной деформации, задаваемую пользователем в табличном виде, разгрузка осуществляется с постоянным модулем, предполагается квадратичная зависимость интенсивности напряжений сдвига от давления (необходимо задать три параметра зависимости) при постоянном модуле сдвига. В модели Замышляева – Евтерева предполагается трехкомпонентная зависимость давления от объемной деформации при учете зависимости от скорости изменения объема. Сдвиговое деформирование описывается аналогично модели грунтов и пеноматериалов. Модель Григоряна в пакете программ «Логос» представлена в обобщенном виде и включает в себя четыре пользовательские зависимости: давления от плотности при нагрузке, скорости звука от плотности при разгрузке, интенсивности напряжений сдвига (предела текучести) от давления, модуля сдвига от плотности.

Общей особенностью моделей является применение зависимости давления от полной объемной деформации аналогично деформационной теории пластичности. Параметры сжимаемости могут быть получены в динамическом и/или квазистатическом эксперименте, как правило, в условиях одноосного деформированного состояния. Далее эти соотношения применяются независимо от вида напряженно-деформированного состояния (НДС). Для описания сдвигового деформирования используется теория течения, допускающая простую практическую реализацию с правилом посадки на поверхность текучести, аналогично идеальной пластичности. Модели

этой категории просты в реализации и достаточно хорошо себя зарекомендовали в задачах анализа поведения геоматериалов при интенсивных ударных и взрывных нагрузках.

Во второй категории геоматериалов применяется разделение деформаций на упругие и пластические. Напряжения связаны с упругими деформациями линейным законом Гука, а для приращения пластических деформаций используется поверхность пластического потенциала, ассоциированная или неассоциированная (модель Кулона – Мора) с поверхностью нагружения. Возможен также учет пластического расширения объема (дилатансия), вызванного сдвиговой нагрузкой при низком ограничивающем давлении [52]. Объемные и сдвиговые характеристики материала рассматриваются совместно, что соответствует повышенному уплотнению при сдвиге и зависимости деформации сдвига от давления. К этой категории относятся геологическая модель с «крышкой» Geologic Cap, бетон CSCM, модели FHWA и Кулона – Мора. Различные модели с «крышкой» отличаются формой поверхности текучести и имеют одинаковую эллиптическую форму поверхности «крышки», описывающую разупрочнение материала при высоком давлении.

Форма сдвиговой поверхности нагружения f в общем случае зависит от инвариантов тензора напряжений и параметров упрочнения и имеет вид:

$$f(J_1, J'_2, J'_3, \beta, \kappa, \dots) = \sqrt{J'_2} - F(J_1, J'_2, J'_3, \beta, \kappa, \dots) = 0, \quad (1)$$

где J_1 – первый инвариант, J'_2, J'_3 – второй и третий инварианты девиатора тензора напряжений соответственно, $F(J_1, J'_2, J'_3, \beta, \kappa, \dots)$ – некоторая материальная функция, β, κ – векторы параметров материала.

Функция $F(J_1, J'_2, J'_3, \beta, \kappa, \dots)$ в зависимости от модели геоматериала включает в себя поверхность отрыва, сдвиговую поверхность разрушения и/или поверхность «крышки» и зависимость от вида напряженного состояния (опционально).

Для описания соотношений (1) часто используются обозначения $p = J_1/3$, $q = \sqrt{3J'_2}$. Меридиональное сечение поверхности нагружения (1) для моделей геоматериалов представлено на рис. 1 в безразмеренном виде на плоскости давление – эффективное напряжение по Мизесу (p^* , q^*). Здесь $p^* = p/q_0$, $q^* = q/q_0$, q_0 определяется из (1) при $p = 0$. На рисунке обозначено: 1 – модель Мора – Кулона, 2 – CSCM, 3 – Geologic Cap, 4 – FHWA.

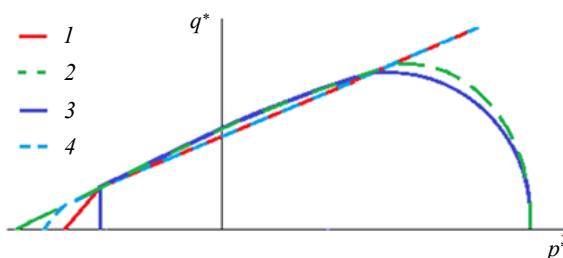


Рис. 1. Схема меридионального сечения поверхности нагружения

Отметим, что зависимость интенсивности напряжений от давления в моделях геоматериалов первой группы задается непосредственно пользователем в табличном виде.

Связь объемных характеристик геоматериала (давление–объемная деформация θ) при изотропном сжатии и последующей разгрузке представлена на рис. 2 в безразмерном виде.

Эта зависимость в моделях геоматериалов первой группы задается непосредственно пользователем. В моделях второй группы зависимость давления от объемной деформации определяется законом пластической сжимаемости для объемной компоненты пластической деформации.

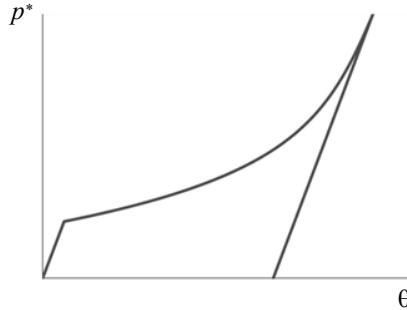


Рис. 2. Связь безразмерных давления и объемной деформации (схема)

Объемная пластическая деформация ε_v^p в общем случае вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_v^p = W(1 - \exp(-D_1(X - X_0) - D_2(X - X_0)^2)), \quad (2)$$

где W, D_1, D_2 – коэффициенты, определяемые параметрами модели; X_0, X – начальное и текущее предельное давление.

Форма зависимости (2) с квадратичной зависимостью показателя от начального X_0 и текущего X предельного давления принята в модели геоматериала CSCM. В модели Geologic Cap принята линейная зависимость ($D_2 = 0$).

По сравнению с первыми моделями грунтов, таких как модель грунтов и пеноматериалов, с разработкой моделей с «крышкой» [53] достигнуто значительное повышение точности моделей геоматериалов. Эти модели имеют явно отличающуюся от линейных материалов поверхность разрушения с ограничениями на растяжение и сжатие. Поверхность нагружения с «крышкой» позволяет описать разрушение материала при сжатии, сдвиге и растяжении, при этом более реалистично моделируется поведение при сложном нагружении [7, 48]. В частности, режимы разрушения, уплотнение и кинематическое упрочнение обеспечивают измельчение в порошок и реалистичное гистерезисное рассеивание энергии, включая эффекты усталости в моделировании.

Для описания механизма кинематического упрочнения применяется концепция активного и обратного напряжения [54]. В этом случае поверхность нагружения (1) в недеформированной конфигурации (или поверхность текучести) определяется путем замены второго инварианта девиатора напряжений J'_2 на второй инвариант тензора активных напряжений:

$$J'_2^H = \frac{1}{2}(S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij}), \quad (3)$$

где α_{ij} – тензор обратных напряжений.

Начальная поверхность нагружения расширяется до совпадения с предельной поверхностью нагружения. Начальное положение поверхности нагружения и ее дальнейшее движение описываются двумя параметрами, задаваемыми пользователем. Параметр N определяет начальное положение поверхности нагружения в абсолютных единицах для модели Geologic Cap или в долях единицы от предельной поверхности для модели CSCM. Параметр C задает скорость смещения поверхности

нагружения. Если задать параметры $N = 0$ и $C = 0$, то механизм кинематического упрочнения будет отключен.

Механизм изотропного упрочнения поверхности нагружения реализован в модели FHWA и заключается в увеличении угла внутреннего трения с ростом объемных пластических деформаций.

Для описания механизмов вязкопластического поведения реализована концепция пробных и невязких напряжений J.C. Simo [55]:

$$\sigma_{ij}^{vp} = (1 - \zeta) \sigma_{ij}^p + \zeta \sigma_{ij}^{trial}, \quad (4)$$

где σ_{ij}^{vp} , σ_{ij}^p и σ_{ij}^{trial} – тензоры вязкопластических, пластических и пробных упругих напряжений соответственно, ζ – параметр вязкопластичности.

На каждом шаге интегрирования по времени вязкопластическое напряжение σ_{ij}^{vp} является интерполяцией между пластическим напряжением σ_{ij}^p и пробным упругим напряжением σ_{ij}^{trial} , вычисленными на этом шаге. В соотношениях (4) безразмерный параметр вязкопластичности ζ зависит от одного параметра скоростных эффектов – времени релаксации [55]. Для лучшего соответствия результатов моделирования и экспериментальных данных количество параметров скоростных эффектов в модели Geologic Cap увеличено до двух. Для учета вида напряженного состояния в модели CSCM пользователь может задать до восьми параметров скоростных эффектов в модели Geologic Cap увеличено до двух. Для учета вида напряженного состояния в модели CSCM пользователь может задать до восьми параметров вязкопластичности. Если безразмерный параметр вязкопластичности $\zeta \rightarrow 0$, то согласно модели вязкопластичности (4) будет получено пластическое решение, если $\zeta \rightarrow 1$ – то упругое.

Для описания механизма накопления повреждений применяется концепция эффективных и приведенных напряжений J.C. Simo [56, 57]:

$$\sigma_{ij}^d = (1 - d) \sigma_{ij}^{vp}. \quad (5)$$

Здесь d – скалярный параметр поврежденности, который преобразует тензор вязкопластических напряжений без поврежденности σ_{ij}^{vp} в тензор напряжений с поврежденностью σ_{ij}^d . Параметр поврежденности d варьируется от нуля при отсутствии повреждений до единицы при полном разрушении.

2. Особенности программной реализации моделей

Первая категория геоматериалов характеризуется сравнительно быстрыми алгоритмами определения НДС на каждом временном шаге, поскольку в моделях этой группы отсутствуют итерационные процессы расчета пластического состояния. В вариантах реализации модели Григоряна без учета зависимости от скорости деформаций применяется известный подход, заключающийся в расчете компонент девиатора тензора напряжений Коши в упругом приближении (пробные напряжения) и последующей посадке на поверхность текучести [2]. В модели Замышляева – Евтерева давление и объемная пластическая деформация на каждом временном шаге определяются в результате решения задачи Коши для системы трех дифференциальных уравнений первого порядка явным или неявным численным методом.

Для моделей второй категории реализованы различные алгоритмы определения напряженного состояния на каждом временном шаге, что приводит к большим вычислительным затратам, но позволяет более достоверно описать поведение грунта. В модели Geologic Cap напряжения на новом временном шаге определяются в результате последовательного решения нескольких нелинейных уравнений методом Ньютона. Возможность сведения к одному уравнению обусловлена независимостью

закона течения (1) от третьего инварианта тензора напряжений или параметра вида НС. В моделях, учитывающих эту зависимость, возникает необходимость решения системы нелинейных уравнений. Итерационный алгоритм модели FHWА предполагает задание пользователем числа итераций – в случае задания пользователем одной итерации применяется линеаризованное решение. Для малых временных шагов такого приближения оказывается вполне достаточно для большинства практических задач явной динамики. Для повышения точности в алгоритме модели CSCM используется разделение на подшаги. Для моделей Мора–Кулона и FHWА реализовано решение системы из семи нелинейных уравнений методом Ньютона, обращение матрицы производных на каждой итерации осуществляется методом Гаусса. Модель геоматериала CSCM предполагает два формата ввода параметров модели: автоматическая генерация на основе четырех параметров материала (плотность, прочность при одноосном сжатии, максимальный размер заполнителя и система единиц) и полный ввод параметров пользователем (44 параметра) [58]. В расчетной практике отмечается [59, 60], что автоматически сгенерированные параметры не всегда корректно отражают поведение материала, наблюдаемое в экспериментах. В [60] предлагается альтернативный способ автоматической генерации параметров модели. В [10] приведена методика оснащения модели CSCM параметрами для почвы на основе экспериментов по одноосному и трехосному сжатию и частично автоматической генерации.

Оснащение моделей материалов параметрами и функциями осуществляется на основе ряда экспериментов при фиксированном виде НДС. Как правило, это одноосное растяжение, одноосное и трехосное сжатие кубиков, призм и цилиндров [10, 30, 59, 60]. Верификационные расчеты проводятся на задачах изгиба балок [30, 60], для сыпучих материалов применяются другие техники эксперимента с использованием ограничивающей обоймы. Тестирование реализации в пакете программ «Логос» нескольких моделей геоматериалов, имеющих схожие механизмы, привело к идею разработки универсального тестового базиса, который содержит список способов нагружения одного восьмиузлового конечного элемента (КЭ) – кубика, а также набор варьируемых параметров материала. Для тестирования алгоритма пластичности и посадки на поверхность нагружения рассматриваются следующие виды нагружения: изотропное растяжение и сжатие, одноосная деформация растяжения и сжатия, одноосное напряженное состояние растяжения и сжатия, чистый сдвиг, трехосное сжатие. Далее будут приведены примеры тестовых расчетов, демонстрирующих работоспособность реализованных моделей геоматериалов.

2.1. Демонстрация зависимости от вида НС. Зависимость алгоритма пластичности от вида НС продемонстрирована для модели геоматериала CSCM на одном восьмиузловом КЭ размером $2,54 \times 2,54 \times 2,54$ см в условиях одноосного сжатия, одноосного растяжения и чистого сдвига. При одноосном НС одна из сторон куба перемещалась вдоль оси Ox с постоянной скоростью 0,5 мм/с, противоположная сторона оставалась в покое, боковые поверхности свободны от нагрузки. При чистом сдвиге одна из сторон куба была жестко защемлена по всем трем осям, противоположная грань смешалась в своей плоскости вдоль оси Ox и была жестко защемлена вдоль двух других осей. Начальная плотность материала 2,32 г/см³. Параметры поверхности нагружения модели CSCM рассчитаны по умолчанию для бетона с прочностью при сжатии $f'_c = 30$ МПа и максимальным размером заполнителя 19 мм. Поврежденность, вязкость и кинематическое упрочнение отключены через параметры модели.

Сравнение работы алгоритма пластичности при различных видах НС приведено на рис. 3 в виде абсолютных величин безразмерных зависимостей осевого или сдвигового напряжения $\sigma^* = \sigma_{ij}/f'_c$ от осевой или сдвиговой деформации $e^* = e_{ij}/e_c$, $e_c = f'_c/E$, E – модуль Юнга. На рис. 3 обозначено: 1 – работа алгоритма при одноосном сжатии, 2 – при чистом сдвиге, 3 – при одноосном растяжении.

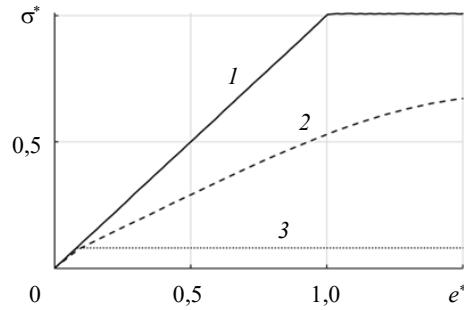


Рис. 3. Зависимость безразмерного напряжения от безразмерной деформации

При растяжении и сжатии параметр жесткости НС (p/q) не меняется, при выходе на поверхность нагружения НС остается на ней, о чем свидетельствует постоянное значение осевых напряжений после достижения пределов прочности (кривые 1 и 3). Предел прочности при одноосном сжатии на порядок (для рассматриваемого случая в 12,5 раз) больше предела прочности при растяжении. При сдвиге после выхода НС на поверхность нагружения происходит рост нормальных компонент тензора напряжений, и параметр жесткости НС принимает ненулевое значение. НС смещается по поверхности нагружения, что приводит к росту сдвигового напряжения после достижения предела прочности при сдвиге (кривая 2).

2.2. Демонстрация алгоритма вязкопластичности. Алгоритм вязкопластичности продемонстрирован на teste при одноосном сжатии, описанном в п. 2.1. Параметры вязкопластичности модели CSCM заданы таким образом, чтобы параметр ζ принимал значения 1; 0,5 и 0.

Сравнение работы алгоритма пластичности при трех значениях параметра вязкопластичности ζ приведено на рис. 4 в виде абсолютных величин безразмерных зависимостей осевого напряжения σ^* от осевой деформации e^* . На рисунке кривая 1 соответствует $\zeta = 1$, кривая 2 – $\zeta = 0,5$, кривая 3 – $\zeta = 0$.

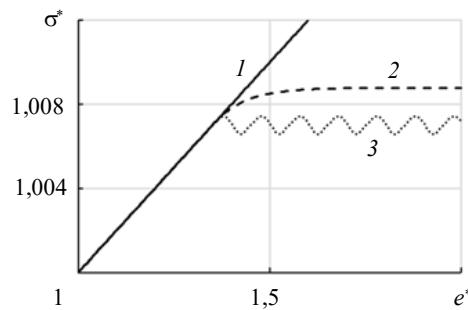


Рис. 4. Зависимость безразмерного напряжения от безразмерной деформации

При $\zeta = 1$ или 0 решение является пластическим или упругим соответственно. При $0 < \zeta < 1$ решение является вязкопластическим.

2.3. Демонстрация алгоритма поврежденности. Алгоритм поврежденности продемонстрирован на модели геоматериала бетон CSCM на тесте при одноосном сжатии, описанном в п. 2.1. Для демонстрации алгоритма поврежденности задано 3 значения параметра энергии разрушения при сжатии: $Gfc = 6,838 \cdot 10^{20}$ МПа·мм (решение без поврежденности), $Gfc = 6,838$ МПа·мм (по умолчанию) и $Gfc = 3,419$ МПа·мм (с поврежденностью).

Сравнение процессов накопления повреждений материала приведено на рис. 5 в виде безразмерных зависимостей осевого напряжения σ^* от осевой деформации e^* , там же показано влияние параметра разупрочнения: $B = 100$ (по умолчанию) и $B = 1000$. На рисунке кривая 1 соответствует $Gfc = 6,838 \cdot 10^{20}$ МПа·мм, $B = 100$; 2 – $Gfc = 6,838$ МПа·мм, $B = 100$; 3 – $Gfc = 3,419$ МПа·мм, $B = 100$; 4 – $Gfc = 6,838$ МПа·мм, $B = 1000$.

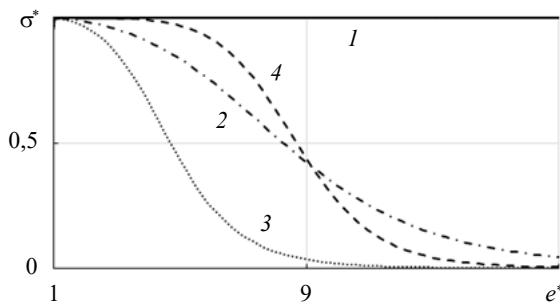


Рис. 5. Зависимость безразмерного осевого напряжения от безразмерной осевой деформации

При одноосном сжатии поврежденность регулируется параметром энергии разрушения Gfc , которая представляет собой площадь под кривой осевое напряжение–удлинение на стадии пластического деформирования. Если задать параметр Gfc очень большим, то будет получено решение, близкое к пластическому (без поврежденности) (кривая 1). Параметр разупрочнения B задает форму кривой при разупрочнении: плавное или резкое снижение напряжения после пикового значения (кривые 2, 4).

2.4. Демонстрация алгоритма «крышки». Алгоритм кинематического упрочнения продемонстрирован на модели геоматериала Geologic Cap на одном восьмиузловом КЭ размером $1 \times 1 \times 1$ см при сжатии в условиях одноосной деформации: перемещение вдоль оси Ox линейно изменялось во времени от нуля до величины $-0,003$ см. При значении времени $0,3$ мс объемная деформация элемента составила $-0,3\%$. Использована модель геоматериала Geologic Cap с параметрами: $RO = 2$, $BULK = 100000$, $G = 150000$, $ALPHA = 100$, $THETA = 0,1$, $GAMMA = 0$, $BETA = 0$, R и $X0$ – варьируются, $D = 4,5 \cdot 10^{-5}$, $W = 0,42$, $C = 0$, $N = 0$, $FTYPE = 1$, $VEC = 1$, $TOFF = -90$.

Для демонстрации алгоритма «крышки» варьируются два параметра «крышки»: R и $X0$. Сравнение процессов динамического деформирования материала приведено в безразмерной плоскости (p^*, q^*) на рис. 6, где кривая 1 соответствует параметру $(4,5; 1500)$; 2 – $(6,5; 1500)$; 3 – $(4,5; 1000)$.

Увеличение начального предельного давления $X0$ приводит к смещению «крышки» и, соответственно, точки пересечения «крышки» со сдвиговой поверхностью разрушения вправо вдоль оси p^* (кривые 1 и 3). Увеличение параметра R при неизменном $X0$ приводит к более вытянутой форме «крышки», при этом точка пересечения «крышки»

ки» со сдвиговой поверхностью разрушения смещается влево вдоль оси p^* (кривые 1, 2).

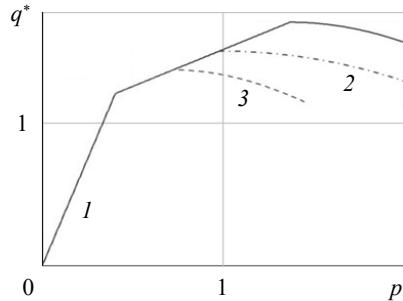


Рис. 6. Демонстрация работы «крышки» для параметров R и $X0$

2.5. Демонстрация алгоритма кинематического упрочнения при сжатии.

Алгоритм кинематического упрочнения продемонстрирован на модели геоматериала Geologic Cap на тесте одноосного сжатия, описанном в п. 2.4. Для демонстрации алгоритма кинематического упрочнения варьируются 2 параметра: C и N . Сравнение процессов динамического деформирования материала приведено в безразмерной плоскости (p^*, q^*) на рис. 7. Кривая 1 на рисунке соответствует $C = 0, N = 0$; 2 – $C = 100000, N = 40$; 3 – $C = 100000, N = 70$; 4 – $C = 0, N = 70$.

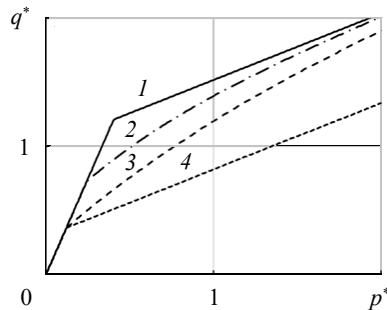


Рис. 7. Демонстрация алгоритма кинематического упрочнения

При $C = 0, N = 0$ кинематическое упрочнение отключено (кривая 1). Значение параметра N можно интерпретировать как величину, на которую уменьшается радиус предельной поверхности нагружения в момент перехода процесса деформирования из упругой области в пластическую. Увеличение параметра N приводит к более раннему началу пластичности (кривые 2, 3, 4). Параметр C регулирует скорость смещения начальной поверхности текучести к предельной. При $C = 0, N \neq 0$ начальная поверхность текучести в процессе деформирования не смещается к предельной (кривая 4).

2.6. Демонстрация алгоритма изотропного упрочнения при сжатии. Алгоритм изотропного упрочнения продемонстрирован на модели геоматериала FHWA на одном восьмиузловом КЭ размером $1 \times 1 \times 1$ см при сжатии в условиях одноосной деформации: перемещение вдоль оси Ox линейно изменялось в процессе счета от нуля до величины $-0,2$ см – объемная деформация элемента составила -20% . Использована модель геоматериала FHWA с параметрами: $RO = 2, NPLT = 6, SPGRAV = 3, RHOWWAT = 1, VN = 0, GAMMAR = 0, ITERMAX = 1, K = 3200, G = 1600, PHIMAX = 0,5, AHYP = 10, COH = 10, ECCEN = 1, AN$ и ET варьируются, $MCONT = 0,03, PWD1 = 0, PWKSK = 1600, PWD2 = 0,001, PHIRES = 0,00001,$

$DINT = 100$, $VDFM = 100$, $DAMLEV = 0$, $EPSMAX = 0,8$. Для демонстрации алгоритма кинематического упрочнения варьируются 2 параметра AN и ET .

Сравнение процессов динамического деформирования материала приведено в безразмерной плоскости (p^*, q^*) на рис. 8, где кривая 1 соответствует параметрам $AN = 0,8$, $ET = 10$; 2 – $AN = 0,8$, $ET = 0$; 3 – $AN = 0,9$, $ET = 0$.

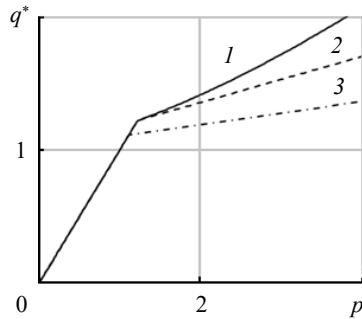


Рис. 8. Демонстрация алгоритма изотропного упрочнения

Параметр AN определяет начальное значение угла внутреннего трения PHI в соответствии с формулой: $PHI0 = PHIMAX * (1 - AN)$. Тангенс угла внутреннего трения определяет наклон поверхности нагружения на безразмерной плоскости (p^*, q^*) (см. рис. 1, 8). При $ET = 0$ изменения угла PHI в процессе счета не происходит, $PHI = PHI0$. При $ET > 0$ происходит изменение угла PHI от начального значения $PHI0$ до $PHIMAX$, задаваемого пользователем.

Заключение

Приведен краткий обзор моделей материалов, применяемых для прогнозирования поведения геологических сред при различных видах напряженного состояния в условиях квазистатического и динамического, в том числе высокоскоростного, нагружения. Выполнен анализ областей применения моделей геоматериалов: грунт Григоряна, Замышляева – Евтерева, Мора – Кулона, FHWA, Geologic Cap, CSCM. Приведена краткая характеристика моделей геоматериалов, реализованных в программном модуле динамической прочности пакета программ «Логос». Рассматриваемые модели могут включать в себя механизмы, реализующие состояние пластичности, кинематическое упрочнение, эффекты вязкопластичности, зависимость от вида напряженного состояния, ограничение поверхности текучести «крышкой» при большом давлении, накопление поврежденности и разрушение. Приведены примеры работы алгоритмов, демонстрирующие возможности моделей геоматериалов, реализованных в пакете программ «Логос».

В обзор, ввиду ограниченности объема, не включен анализ ряда реализованных в «Логос Прочность» моделей, таких как «Бетон Джонсона – Холмквиста» [61], «Псевдо-тензор» [62], «Бетон с поврежденностью» [63] и другие, хотя эти модели также успешно применяются в расчетной практике для моделирования задач резания горных пород и взрывного разрушения связных грунтов [18, 41, 64]. Приведенный в этой статье анализ и обобщение моделей позволяют потенциальным пользователям определиться с выбором модели геоматериала, исходя из постановки прикладной задачи и возможностей по наполнению модели параметрами.

Список литературы

1. Moixnes J.F., Frøyland Ø., Skriudalen S. et al. On the study of ricochet and penetration in sand, water and gelatin by spheres, 7.62 mm APM2, and 25 mm projectiles. *Defence Technology*. 2016. Vol. 12. Iss. 2. P. 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2015.12.004>.
2. Bazhenov V.G., Balandin V.V., Grigoryan S.S., Kotov V.L. Analysis of models for calculating the motion of solids of revolution of minimum resistance in soil media. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2014. Vol. 78. Iss. 1. P. 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2014.05.008>.
3. Bragov A.M., Balandin V.V., Igumnov L.A., Kotov V.L., Kruszka L., Lomunov A.K. Impact and penetration of cylindrical bodies into dry and water-saturated sand. *International Journal of Impact Engineering*. 2018. Vol. 122. P. 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.012>.
4. Брагов А.М., Баландин В.В., Котов В.Л., Баландин В.В., Линник Е.Ю. Экспериментальное исследование удара и проникания конического ударника в мерзлый песчаный грунт. *Прикладная механика и техническая физика*. 2018. Т. 59. №3. С. 111–120. <https://doi.org/10.15372/PMTF20180312>.
5. Eremeyev V.A., Balandin V.I.V., Balandin V.I.VI., Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Igumnov L.A. Experimental study and numerical simulation of the dynamic penetration into dry clay. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2023. Vol. 35. Iss. 2. P. 457–469. <https://doi.org/10.1007/s00161-023-01189-w>.
6. Будков А.М., Кочарян Г.Г. Численное моделирование механического и сейсмического действий взрыва на большой глубине. *Динамические процессы в геосферах*. 2024. Т. 16. №2. С. 11–21. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_2_11.
7. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х., Мягков К.А., Новичков Г.А. Численное решение задачи бурения скважины шнеком. *Геотехника*. 2015. №5. С. 40–53.
8. Barr A.D. Strain-rate effects in quartz sand. *PhD Thesis*. Great Britain, Sheffield: University of Sheffield, 2016. 202 p.
9. Kim S.B., Kim H.W., Yoo Y.H. Penetration analysis of projectile with inclined concrete target. *EPJ Web of Conferences*. 2015. Vol. 94. Article No 04052. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159404052>.
10. Lee J., Choi Y., Bai Y. Investigation on high velocity impact of projectile on double layered geomaterial. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2022. Vol. 26. Iss. 5. P. 2089–2096. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0874-y>.
11. Вақуленко А.М. Методология численного расчета разрушающей ледовой нагрузки от киля тороса. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2014. Вып. 2. №195. С. 78–84.
12. Patil A., Sand B., Fransson L. et al. Simulation of brash ice behavior in the gulf of bothnia using smoothed particle hydrodynamics formulation. *Journal of Cold Regions Engineering*. 2021. Vol. 35. No 2. Article No 01767643. DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000245.
13. Patil A., Sand B., Cwirzen A., Fransson L. Numerical prediction of ice rubble field loads on the Norströmsgrund lighthouse using cohesive element formulation. *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 223(14). Article No 108638. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108638.
14. Saleh M., Edwards L. Evaluation of soil and fluid structure interaction in blast modelling of the flying plate test. *Computers & Structures*. 2015. Vol. 151. P. 96–114. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.01.010.
15. Linforth S., Tran Ph., Rupasinghe M. et al. Unsaturated soil blast: Flying plate experiment and numerical investigations. *International Journal of Impact Engineering*. 2019. Vol. 125. P. 212–228.
16. Karimi A., Razaghi R., Girkin Ch.A., Downs J.C. Ocular biomechanics during improvised explosive device blast: A computational study using eye-specific models. *Injury*. 2022. Vol. 53(4). P. 1401–1415. DOI: 10.1016/j.injury.2022.02.008.
17. Baranowski M., Kucewicz R., Gieleta R. et al. Fracture and fragmentation of dolomite rock using the JH-2 constitutive model: Parameter determination, experiments and simulations. *International Journal of Impact Engineering*. 2020. Vol. 140. Article No 103543. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103543.

18. Busch C.L., Tarefder R.A. Evaluation of appropriate material models in LS-DYNA for MM-ALE finite element simulations of small-scale explosive airblast tests on clay soils. *Indian Geotechnical Journal*. 2016. Vol. 47. Iss. 2. P. 173–186. DOI: 10.1007/s40098-016-0196-4.
19. Han Y., Zhang L., Yang X. Soil-tunnel interaction under medium internal blast loading. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 143. P. 403–410. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.051.
20. Han Y., Zhang L. Response of fully prefabricated subway stations subjected to internal blast loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 861(3). P. 032098-1–032098-8. DOI: 10.1088/1755-1315/861/3/032098.
21. Jiang J., Zhang E., Zhao Y. et al. Dynamic modeling and simulation of shield tunneling cutter-head in oscillatory excavation. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 55. Iss. 5. P. 113–120. DOI: 10.3901/JME.2019.05.113.
22. Wang Y.-G., Liao C.C., Wang J.-H., Wang W. Numerical study for dynamic response of marine sediments subjected to underwater explosion. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 156. P. 72–81. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.106.
23. Wang Y.-G., Liao C.C., Wang J.-H., Jeng D.-S. Dynamic response of pipelines with various burial depth due to underwater explosion. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 164. P. 114–126. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.045.
24. Тациенко А.Л. Обоснование параметров устройства для поинтервального гидроизрыва при пластовой дегазации угля. Дисс. ... канд. техн. наук. Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово. 2021. 134 с.
25. Журавков М.А., Николайчик М.А., Климкович Н.М. Моделирование геомеханического состояния породного массива при отработке подземного пространства большими площадями. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2022. №4 (61). С. 97–104. <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-97-104>.
26. Alomari Q., Linzell D. Advanced analysis of intact, fire-damaged, and cfrp retrofitted bridge pier columns under vehicle collisions: empirical equivalent static force equation and framework. *Engineering Structures*. 2024. Vol. 314. Article No 118250. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118250.
27. Fang Ch., Yosef T.Y., Linzell D.G., Rasmussen J.D. Computational modeling and dynamic response of highway bridge columns subjected to combined vehicle collision and air blast. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 125. Article No 105389. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105389.
28. Woo K.S., Lee D.W., Ahn J.S. Impact behavior of a laterally loaded guardrail post near slopes by hybrid SPH model. *Advances in Civil Engineering*. 2018. Vol. 2018. P. 9479452-1 – 9479452-12. DOI: 10.1155/2018/9479452.
29. Lee D.W., Ahn J.S., Woo K.S. Vehicle impact analysis of flexible barriers supported by different shaped posts in sloping ground. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014. Vol. 2014. P. 1–8. DOI: 10.1155/2014/705629.
30. Murray Y.D., Abu-Odeh A.Y., Bligh R.P. *Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159*. Report No FHWA-HRT-05-063. 2007. 210 p.
31. Sabbir Siddique, Faria Sharmin, Sonam K. Tobgay. Damage study of dhamdum bridge concrete pier by flowing rock impact. *Conference paper in IABSE Congress: Bridges and Structures: Connection, Integration and Harmonisation*. Nanjing, People's Republic of China. 21–23 Sept. 2022. P. 1784–1790. DOI: 10.2749/nanjing.2022.1784.
32. Jayasinghe L.B., Thambiratnam D.P., Perera N., Jayasooriya J.H.A.R. Blast response and failure analysis of pile foundations subjected to surface explosion. *Engineering Failure Analysis*. 2014. Vol. 39. P. 41–54. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFILANAL.2014.01.013>.
33. Jayasinghe L.B., Thambiratnam D., Perera N.J., Jayasooriya R. Effect of soil properties on the response of pile to underground explosion. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*. 2014. Vol. 24. Iss. 3. P. 361–370. DOI: 10.2749/101686614X13854694314522.
34. Xia K., Masud A. A stabilized finite element formulation for finite deformation elasto-plasticity in geomechanics. *Computers and Geotechnics*. 2008. Vol. 36. Iss. 3. P. 396–405. DOI: 10.1016/j.compgeo.2008.05.001.
35. Wu J.T.H., Lee K.Z.Z., Pham Th. Allowable bearing pressures of bridge sills on GRS

- abutments with flexible facing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006. Vol. 132. Iss. 7. P. 830–841. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:7(830).
36. Tian D., Zheng H. The generalized Mohr-Coulomb failure criterion. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 9. Article No 5405. <https://doi.org/10.3390/app13095405>.
37. Sun J., Wang Y., Zhang S.J. et al. The mechanism of resistance-reducing/anti-adhesion and its application on biomimetic disc furrow opener. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2020. Vol. 17. Iss. 5. P. 4657–4677. DOI: 10.3934/mbe.2020256.
38. Yang W., Li X., Wang R. et al. Numerical simulation test of maximum stress of tuber in cassava lifting. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 32. Iss. 6. P. 58–64. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.06.008.
39. Jiang J., Hoogmoed W., Tao G., Gao J., Zhang X. Research on a special scarifier mechanism with finite element analysis method. *Advanced Materials Research*. 2012. Vols. 433–440. P. 1044–1051. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.1044.
40. Tagar A.A., Changying J., Adamowski J. et al. Finite element simulation of soil failure patterns under soil bin and field testing conditions. *Soil and Tillage Research*. 2015. Vol. 145. P. 157–170. DOI: 10.1016/j.still.2014.09.006.
41. Rokhy H., Mirzababaie T., Tohid M., Mostofi M., Ozbaakkaloglu T. Calibration of different constitutive material models for Vosges sandstone due to its application in rock-cutting processes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022. Vol. 44. Iss. 10. Article No 468. DOI: 10.1007/s40430-022-03764-9.
42. Daryaei R., Eslami A. Settlement evaluation of explosive compaction in saturated sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017. Vol. 97. P. 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.015>.
43. Suazo G., Villavicencio G. Numerical simulation of the blast response of cemented paste backfilled stopes. *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 100. P. 1–14. DOI: 10.1016/J.COMPGEO.2018.04.007.
44. Asvar F., Shirmohammadi A., Barkhordari Bafghi K. Predicting potential of blast-induced soil liquefaction using neural networks and neuro-fuzzy system. *Scientia Iranica*. 2018. Vol. 25. Iss. 2. P. 617–631. DOI: 10.24200/sci.2017.4184.
45. Rokhy H., Nasouri R., Montaya A. et al. Calibration of six constitutive material models for geomaterial. *13th European LS-DYNA Conf*. Ulm, Germany. 2021. P. 1–18.
46. Lee Z.Z., Chang N.Y., Chang K.-T. et al. Determination of cap model parameters using drained convectional triaxial compression test results. *27th Annual USSD Conference*. Philadelphia, Pennsylvania. 5–9 March. 2007. P. 275–284.
47. Eriksen I.Ø. Finite element analyse af pulverkomprættingsproces for ikke – bonded permanente neodymbaserede magnetar. *Kandidatspeciale*. Aalborg Universitet. Institut for Mekanik og Produktion Virksomhedsteknologi. 2011. 131 p.
48. Stanley G.S., Darrel A.D. Finite element simulation of the compaction and springback of alumix 321 PM alloy. *Journal of Applied Mathematics*. 2015. Vol. 2015. Iss. 1. Article No 283843. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/283843>.
49. Дьянов Д.Ю., Спиридонов В.Ф., Цибирев К.В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов*. 2018. Вып. 1. С. 3–14.
50. Jiang H., Zhao J. Calibration of the continuous surface cap model for concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015. Vol. 97. P. 1–19 <https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.12.002>.
51. *LS-DYNA Keyword User's Manual. Vol. II Material Models*. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2014. 1251 p.
52. Kupfer H., Hilsdorf H.K., Rusch H. Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of American Concrete Institute*. 1969. Vol. 66. Iss. 8. P. 545–666.
53. Sandler I.S., Rubin D. An algorithm and a modular subroutine for the CAP model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1979. Vol. 3. P. 173–186. DOI: 10.1002/NAG.1610030206.
54. Schwer L.E., Murray Y.D. A Three invariant smooth cap model with mixed hardening. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1994. Vol. 18. P. 657–688.

55. Simo J.C., Ju J.-W., Pister K.S., Taylor R.L. Assessment of cap model: consistent return algorithms and rate-dependent extension. *Journal of Engineering Mechanics*. 1988. Vol. 114. No 2. P. 191–218. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9399(1988)114:2(191).
56. Simo J.C., Ju J.W. Strain- and stress-based continuum damage models – I. formulation. *International Journal of Solids and Structures*. 1987. Vol. 23. No 7. P. 821–840. DOI: 10.1016/0020-7683(87)90083-7.
57. Simo J.C., Ju J.W. Strain- and stress-based continuum damage models - II. Computational aspects. *International Journal of Solids and Structures*. 1987. Vol. 23. No 7. P. 841–869. DOI: 10.1016/0020-7683(87)90084-9.
58. Murray Y.D. *User's Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159*. Report No. FHWAHRT05062. Federal Highway Administration. 2007. 89 p.
59. Сафаров А.Р., Дорожинский В.Б., Андреев В.И. Реализация численной модели бетона CSCM применительно к отечественным классам бетонов. *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. Вып. 4. С. 545–555. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.545-555.
60. Novozhilov Y.V., Dmitriev A.N., Mikhalkin D.S. Precise calibration of the continuous surface cap model for concrete simulation. *Buildings*. 2022. Vol. 12. P. 636-1 – 636-23. <https://doi.org/10.3390/buildings12050636>.
61. Holmquist T.J., Johnson G.R., Cook W.H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. *Ballistics '93. 14th International Symposium. Proceedings*. Quebec City, Canada. 1993. Vol. 2. P. 591–600.
62. Hallquist J.O. *LS-DYNA Theory Manual*. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2015.
63. Абақумов А.И., Сафонов И.И., Смирнов А.С., Дьянов Д.Ю., Медведкина М.В. Модифицированная модель бетона Karagozian&Case в пакете программ «Логос». *Проблемы прочности и пластичности*. 2023. Т. 85. № 2. С. 224–242. DOI: 10.32326/1814-9146-2022-85-2-224-242.
64. Parfilko Ye. Study of damage progression in CSCM concretes under repeated impacts. *Thesis*. Rochester, USA: Rochester Institute of Technology, 2017. 73 p.

References

1. Moxnes J.F., Frøyland Ø., Skriudalen S. et al. On the study of ricochet and penetration in sand, water and gelatin by spheres, 7.62 mm APM2, and 25 mm projectiles. *Defence Technology*. 2016. Vol. 12. Iss. 2. P. 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2015.12.004>.
2. Bazhenov V.G., Balandin V.V., Grigoryan S.S., Kotov V.L. Analysis of models for calculating the motion of solids of revolution of minimum resistance in soil media. *J. Appl. Math. Mech.* 2014. Vol. 78. Iss. 1. P. 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2014.05.008>.
3. Bragov A.M., Balandin V.V., Igumnov L.A., Kotov V.L., Kruszka L., Lomunov A.K. Impact and penetration of cylindrical bodies into dry and water-saturated sand. *Int. J. Impact Eng.* 2018. Vol. 122. P. 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.012>.
4. Bragov A.M., Balandin V.V., Kotov V.L., Linnik E.Y. Experimental study of the impact and penetration of a cone in frozen sand. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2018. Vol. 59. Iss. 3. P. 482–490.
5. Eremeyev V.A., Balandin Vl.V., Balandin Vl.Vl., Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Igumnov L.A. Experimental study and numerical simulation of the dynamic penetration into dry clay. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2023. Vol. 35. Iss. 2. P. 457–469. <https://doi.org/10.1007/s00161-023-01189-w>.
6. Budkov A.M., Kocharyan G.G. Chislennoe modelirovanie mekhanicheskogo i seismicheskogo deystviy vzryva na bolshoy glubine [Numerical simulation of mechanical and seismic effects of explosion at great depth]. *Dinamicheskie protsessy v geosferakh* [Dynamic Processes in Geospheres]. 2024. Vol. 16. No 2. P. 11–21 (In Russian).
7. Boldyrev G.G., Idrisov I.Kh., Miagkov K.A., Novichkov G.A. Chislennoe reshenie zadachi bureniya skvazhiny shnekom [Numerical solution for the problem of drilling a hole with continuous three-bit auger]. *Geotekhnika* [Geotechnics]. 2015. No 5. P. 40–53 (In Russian).
8. Barr A.D. Strain-rate effects in quartz sand. *PhD Thesis*. Great Britain, Sheffield. University of Sheffield. 2016. 202 p.

9. Kim S.B., Kim H.W., Yoo Y.H. Penetration analysis of projectile with inclined concrete target. *EPJ Web of Conferences*. 2015. Vol. 94. Article No 04052. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159404052>.
10. Lee J., Choi Y., Bai Y. Investigation on high velocity impact of projectile on double layered geomaterial. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2022. Vol. 26. Iss. 5. P. 2089–2096. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0874-y>.
11. Vakulenko A.M. Metodologiya chislennogo rascheta razrushayushchey ledovoy nagonuzki o kilya torosa [Methodology of numerical calculation of breaking load from ice ridge keel]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [St. Petersburg Politechnik University Journal: Physics and Mathematics]. 2014. Vol. 2. No 195. P. 78–84 (In Russian).
12. Patil A., Sand B., Fransson L. et al. Simulation of brash ice behavior in the gulf of bothnia using smoothed particle hydrodynamics formulation. *Journal of Cold Regions Engineering*. 2021. Vol. 35. No 2. Article No 01767643. DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000245.
13. Patil A., Sand B., Cwirzen A., Fransson L. Numerical prediction of ice rubble field loads on the Norströmsgrund lighthouse using cohesive element formulation. *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 223(14). Article No 108638. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108638.
14. Saleh M., Edwards L. Evaluation of soil and fluid structure interaction in blast modelling of the flying plate test. *Computers & Structures*. 2015. Vol. 151. P. 96–114. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.01.010.
15. Linforth S., Tran Ph., Rupasinghe M. et al. Unsaturated soil blast: Flying plate experiment and numerical investigations. *Int. J. Impact Eng.* 2019. Vol. 125. P. 212–228.
16. Karimi A., Razaghi R., Girkin Ch.A., Downs J.C. Ocular biomechanics during improvised explosive device blast: A computational study using eye-specific models. *Injury*. 2022. Vol. 53(4). P. 1401–1415. DOI: 10.1016/j.injury.2022.02.008.
17. Baranowski M., Kucewicz R., Gieleta R. et al. Fracture and fragmentation of dolomite rock using the JH-2 constitutive model: Parameter determination, experiments and simulations. *Int. J. Impact Eng.* 2020. Vol. 140. Article No 103543. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103543.
18. Busch C.L., Tarefder R.A. Evaluation of appropriate material models in LS-DYNA for MM-ALE finite element simulations of small-scale explosive airblast tests on clay soils. *Indian Geotechnical Journal*. 2016. Vol. 47. Iss. 2. P. 173–186. DOI: 10.1007/s40098-016-0196-4.
19. Han Y., Zhang L., Yang X. Soil-tunnel interaction under medium internal blast loading. *Procedia Eng.* 2016. Vol. 143. P. 403–410. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.051.
20. Han Y., Zhang L. Response of fully prefabricated subway stations subjected to internal blast loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 861(3). P. 032098-1–032098-8. DOI: 10.1088/1755-1315/861/3/032098.
21. Jiang J., Zhang E., Zhao Y. et al. Dynamic modeling and simulation of shield tunneling cutter-head in oscillatory excavation. *J. Mech. Eng.* 2019. Vol. 55. Iss. 5. P. 113–120. DOI: 10.3901/JME.2019.05.113.
22. Wang Y.-G., Liao C.C., Wang J.-H., Wang W. Numerical study for dynamic response of marine sediments subjected to underwater explosion. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 156. P. 72–81. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.106.
23. Wang Y.-G., Liao C.C., Wang J.-H., Jeng D.-S. Dynamic response of pipelines with various burial depth due to underwater explosion. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 164. P. 114–126. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.045.
24. Tatsienko A.L. Obosnovanie parametrov ustroystva dlya pointervalnogo gidrorazryva pri plastovoy degazatsii uglya [Justification of the parameters of the device for intermittent hydraulic fracturing during reservoir coal degassing]. *Diss. ... kand. tekhn. nauk* [Cand. Sci. (Engineering). Dissertation]. T.F. Gorbachev State Technical University. Kemerovo. 2021. 134 p. (In Russian).
25. Zhuravkov M.A., Nikolaychik M.A., Klimkovich N.M. Modelirovanie geomekhanicheskogo sostoyaniya porodnogo massiva pri otrabotke podzemnogo prostranstva bolshimi ploshchadyami [Modelling of geomechanical state of the rock mass during the large scale mining of underground space]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials]. 2022. No 4 (61). P. 97–104 (In Russian).

26. Alomari Q., Linzell D. Advanced analysis of intact, fire-damaged, and cfrp retrofitted bridge pier columns under vehicle collisions: empirical equivalent static force equation and framework. *Eng. Struct.* 2024. Vol. 314. Article No 118250. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118250.
27. Fang Ch., Yosef T.Y., Linzell D.G., Rasmussen J.D. Computational modeling and dynamic response of highway bridge columns subjected to combined vehicle collision and air blast. *Eng. Fail. Anal.* 2021. Vol. 125. Article No 105389. DOI: 10.1016/j.englfailanal.2021.105389.
28. Woo K.S., Lee D.W., Ahn J.S. Impact behavior of a laterally loaded guardrail post near slopes by hybrid SPH model. *Adv. Civ. Eng.* 2018. Vol. 2018. P. 9479452-1 – 9479452-12. DOI: 10.1155/2018/9479452.
29. Lee D.W., Ahn J.S., Woo K.S. Vehicle impact analysis of flexible barriers supported by different shaped posts in sloping ground. *Adv. Mech. Eng.* 2014. Vol. 2014. P. 1–8. DOI: 10.1155/2014/705629.
30. Murray Y.D., Abu-Odeh A.Y., Bligh R.P. *Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159*. Report No FHWA-HRT-05-063. 2007. 210 p.
31. Sabbir Siddique, Faria Sharmin, Sonam K. Tobgay. Damage study of dhamdum bridge concrete pier by flowing rock impact. *Conference paper in IABSE Congress: Bridges and Structures: Connection, Integration and Harmonisation*. Nanjing, People's Republic of China. 21–23 Sept. 2022. P. 1784–1790. DOI: 10.2749/nanjing.2022.1784.
32. Jayasinghe L.B., Thambiratnam D.P., Perera N., Jayasooriya J.H.A.R. Blast response and failure analysis of pile foundations subjected to surface explosion. *Eng. Fail. Anal.* 2014. Vol. 39. P. 41–54. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2014.01.013>.
33. Jayasinghe L.B., Thambiratnam D., Perera N.J., Jayasooriya R. Effect of soil properties on the response of pile to underground explosion. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*. 2014. Vol. 24. Iss. 3. P. 361–370. DOI: 10.2749/101686614X13854694314522.
34. Xia K., Masud A. A stabilized finite element formulation for finite deformation elastoplasticity in geomechanics. *Computers and Geotechnics*. 2008. Vol. 36. Iss. 3. P. 396–405. DOI: 10.1016/j.compgeo.2008.05.001.
35. Wu J.T.H., Lee K.Z.Z., Pham Th. Allowable bearing pressures of bridge sills on GRS abutments with flexible facing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006. Vol. 132. Iss. 7. P. 830–841. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:7(830).
36. Tian D., Zheng H. The generalized Mohr-Coulomb failure criterion. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 9. Article No 5405. <https://doi.org/10.3390/app13095405>.
37. Sun J., Wang Y., Zhang S.J. et al. The mechanism of resistance-reducing/anti-adhesion and its application on biomimetic disc furrow opener. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2020. Vol. 17. Iss. 5. P. 4657–4677. DOI: 10.3934/mbe.2020256.
38. Yang W., Li X., Wang R. et al. Numerical simulation test of maximum stress of tuber in cassava lifting. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 32. Iss. 6. P. 58–64. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.06.008.
39. Jiang J., Hoogmoed W., Tao G., Gao J., Zhang X. Research on a special scarifier mechanism with finite element analysis method. *Adv. Mater. Res.* 2012. Vols. 433-440. P. 1044–1051. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.1044.
40. Tagar A.A., Changyin J., Adamowski J. et al. Finite element simulation of soil failure patterns under soil bin and field testing conditions. *Soil Tillage Res.* 2015. Vol. 145. P. 157–170. DOI: 10.1016/j.still.2014.09.006.
41. Rokhy H., Mirzababaie T., Tohid M., Mostofi M., Ozbaakkaloglu T. Calibration of different constitutive material models for Vosges sandstone due to its application in rock-cutting processes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022. Vol. 44. Iss. 10. Article No 468. DOI: 10.1007/s40430-022-03764-9.
42. Daryaei R., Eslami A. Settlement evaluation of explosive compaction in saturated sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017. Vol. 97. P. 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.015>.
43. Suazo G., Villavicencio G. Numerical simulation of the blast response of cemented paste backfilled stopes. *Comput. Geotech.* 2018. Vol. 100. P. 1–14. DOI: 10.1016/J.COMPGEOTEC.2018.04.007.

44. Asvar F., Shirmohammadi A., Barkhordari Bafghi K. Predicting potential of blast-induced soil liquefaction using neural networks and neuro-fuzzy system. *Scientia Iranica*. 2018. Vol. 25. Iss. 2. P. 617–631. DOI: 10.24200/sci.2017.4184.
45. Rokhy H., Nasouri R., Montaya A. et al. Calibration of six constitutive material models for geomaterial. *13th European LS-DYNA Conf.* Ulm, Germany. 2021. P. 1–18.
46. Lee Z.Z., Chang N.Y., Chang K.-T. et al. Determination of cap model parameters using drained convectional triaxial compression test results. *27th Annual USSD Conference*. Philadelphia, Pennsylvania. 5–9 March. 2007. P. 275–284.
47. ErikSEN I.O. Finite element analyse af pulverkomprættingsproces for ikke – bonded permanente neodymbaserede magnetar. *Kandidatspeciale*. Aalborg Universitet. Institut for Mekanik og Produktion Virksomhedsteknologi. 2011. 131 p.
48. Stanley G.S., Darrel A.D. Finite element simulation of the compaction and springback of alumix 321 PM alloy. *Journal of Applied Mathematics*. 2015. Vol. 2015. Iss. 1. Article No 283843. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/283843>.
49. D'yanov D.Yu., Spiridonov V.F., Tsiberev K.V. et al. Paket programm LOGOS. Modul resheniya dinamicheskikh zadach prochnosti [LOGOS program package. A module for solving the dynamic strength problems]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov [Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki (VANT). Series: Mathematical Modeling of Physical Processes]*. 2018. Iss. 1. P. 3–14 (In Russian).
50. Jiang H., Zhao J. Calibration of the continuous surface cap model for concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015. Vol. 97. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.12.002>.
51. *LS-DYNA Keyword User's Manual. Vol. II Material Models*. Livermore, California. Livermore Software Technology Corporation. 2014. 1251 p.
52. Kupfer H., Hilsdorf H.K., Rusch H. Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of American Concrete Institute*. 1969. Vol. 66. Iss. 8. P. 545–666.
53. Sandler I.S., Rubin D. An algorithm and a modular subroutine for the CAP model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1979. Vol. 3. P. 173–186. DOI: 10.1002/NAG.1610030206.
54. Schwer L.E., Murray Y.D. A Three invariant smooth cap model with mixed hardening. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1994. Vol. 18. P. 657–688.
55. Simo J.C., Ju J.-W., Pister K.S., Taylor R.L. Assessment of cap model: consistent return algorithms and rate-dependent extension. *Journal of Engineering Mechanics*. 1988. Vol. 114. No 2. P. 191–218. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9399(1988)114:2(191).
56. Simo J.C., Ju J.W. Strain- and stress-based continuum damage models – I. Formulation. *International Journal of Solids and Structures*. 1987. Vol. 23. No 7. P. 821–840. DOI: 10.1016/0020-7683(87)90083-7.
57. Simo J.C., Ju J.W. Strain- and stress-based continuum damage models – II. Computational aspects. *International Journal of Solids and Structures*. 1987. Vol. 23. No 7. P. 841–869. DOI: 10.1016/0020-7683(87)90084-9.
58. Murray Y.D. *User's Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159*. Report No. FHWAHRT05062. Federal Highway Administration. 2007. 89 p.
59. Safarov A.R., Dorozhinskij V.B., Andreev V.I. Realizatsiya chislennoy modeli betona CSCM primenitelno k otechestvennym klassam betonov [Implementation of CSCM concrete numerical model for domestic concrete classes]. *Vestnik MGСU [Vestnik Moscow State University of Civil Engineering]*. 2023. Vol. 18. Iss. 4. P. 545–555 (In Russian).
60. Novozhilov Y.V., Dmitriev A.N., Mikhalkin D.S. Precise calibration of the continuous surface cap model for concrete simulation. *Buildings*. 2022. Vol. 12. P. 636-1 – 636-23. <https://doi.org/10.3390/buildings12050636>.
61. Holmquist T.J., Johnson G.R., Cook W.H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. *Ballistics '93. 14th International Symposium. Proceedings*. Quebec City, Canada. 1993. Vol. 2. P. 591–600.
62. Hallquist J.O. *LS-DYNA Theory Manual*. Livermore. Livermore Software Technology Corporation. 2015.
63. Abakumov A.I., Safronov I.I., Smirnov A.S., Dyanov D.Yu., Medvedkina M.V. Modifi-

tsirovannaya model betona Karagozian&Case v pakete programm “Logos” [A modified model of karagozian & case concrete in “Logos” software package]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2023. Vol. 85. No 2. P. 224–242 (In Russian).

64. Parfilko Ye. Study of damage progression in CSCM concretes under repeated impacts. *Thesis*. Rochester, USA. Rochester Institute of Technology. 2017. 73 p.

SOIL MODELING TOOLS IN THE “LOGOS” SOFTWARE PACKAGE

Dyanov D.Yu., Dyukina N.S., Kotov V.L., Nagornykh E.V.

Institute of Theoretical and Mathematical Physics of Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (RFNC – VNIIEF), Sarov, Russian Federation

dydyanov@vniief.ru

Received by the Editor 2025/08/23

The paper gives a brief overview of material models used in computational practice for predicting the behavior of geological media under conditions of high and low pressure, complex stress conditions under quasi-static and dynamic loading, including the high-speed one. The analysis of the application areas of geomaterial models implemented in the dynamic strength software module of the “Logos” software package is performed. The models are conventionally divided into two categories. A feature of the models of the first category (Grigoryan's and Zamyslyayev–Evteev's ground environment) is the application of pressure dependence on total volumetric deformation, like the deformation theory of plasticity. The models in this category are easy to implement.

The second category of geomaterials (Geologic Cap model, CSCM concrete, FHWA and Mohr–Coulomb models) uses the separation of elastic and plastic deformations. To calculate the increments of plastic deformations, the surface of the plastic potential is used, associated or not associated (Mohr–Coulomb model) with the loading surface. It is also possible to account for plastic volume expansion (dilatation) caused by shear stress at low all-round pressure. The shape of the shear loading surface generally includes a separation surface, a fracture shear surface and/or a lid surface and optional dependence on the type of stress state.

The dependence of pressure on volumetric deformation in the models of geomaterials of the first group is set directly by the user, the second group is determined by the law of plastic compressibility for the volumetric component of plastic deformation. The models of the second group are complemented by mechanisms of kinematic hardening (the concept of active and reverse stress), viscoplastic behavior (the concept of trial and inviscid stresses), and damage accumulation (the concept of effective and reduced stresses).

Examples of test calculations on a single finite element in the dynamic strength software module of the “Logos” software package are given, demonstrating the operability of the algorithms for: plasticity and taking into account the type of stress state on the CSCM geomaterial model under tension, compression and shear; viscoplasticity, damage on the CSCM geomaterial model under compression; cap, kinematic hardening on the Geologic Cap geomaterial model under compression; isotropic hardening – based on the FHWA geomaterial model under compression.

Keywords: geomaterial models, Grigoryan model, Soil and Foam model, Zamyslyayev–Evteev model, Geologic Cap, CSCM, FHWA, Mohr–Coulomb model, “Logos” SP.