

УДК 539.3;539.4

## РАЗВИТИЕ НЕУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ГЕОМАТЕРИАЛАХ В РЕЖИМАХ ДИЛАТАНСИИ И УПЛОТНЕНИЯ

© 2011 г.

*Ю.П. Стефанов*

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

yu\_st@rambler.ru

*Поступила в редакцию 15.06.2011*

Представлены результаты численного решения ряда задач, иллюстрирующих особенности поведения геоматериалов в различных условиях. Численно исследовано развитие деформации в режимах дилатансии и компактии в рамках математической модели с комбинированной предельной поверхностью замкнутого типа и неассоциированного закона течения. Предложены соотношения, описывающие взаимосвязь изменения поверхности предельного состояния и коэффициента дилатансии, которые позволяют учесть изменения режимов развития деформации. Рассмотрено влияние глубины, давления и пористости среды на характер локализации деформации. Показано, что смена режимов деформирования с дилатансии на компакцию может быть вызвана не только изменением напряженного состояния, но и изменением свойств среды в ходе процесса, а именно, с накопленной объемной деформацией.

*Ключевые слова:* горные породы, определяющие соотношения, дилатансия, компакция, локализация, пластическая деформация, пористость.

Известно, что в зависимости от условий нагружения и свойств геосреды развитие деформации может протекать в режимах дилатансии и компактии. Возможность реализации каждого из этих режимов обычно разделяют с учетом действующей нагрузки и пористости среды. В то же время экспериментальные данные говорят о том, что наряду с возможностью реализации двух указанных режимов деформации, при которых наблюдается дилатансия (разрыхление) или компакция (уплотнение), в зонах локализации деформации могут наблюдаться смешанные и переходные режимы. На определенном интервале давлений принципиальных различий в особенностях поведения плотных, консолидированных и пористых пород не проявляется. Сдвиговая деформация за пределом упругости сопровождается объемными изменениями и сильно зависит от давления. В случае плотной среды образованию крупных трещин, разломов, как правило, предшествует разрыхление, рассеянное накопление микротрещин с увеличением объема и ростом пористости и последующая локализация деформации. В высокопористой среде увеличение давления приводит к разрушению зерен. Их обломки забиваются в поры, поровое пространство сокращается и снижается проницаемость среды. В этом случае могут формироваться зоны локализованного уплотнения и сдвига с уплотнением.

Различие в поведении плотных и высокопо-

ристых сред при большом давлении проявляется также в ориентации полос локализации деформации. В плотных, а также в высокопористых материалах при давлении ниже порогового полосы локализации образуют угол менее  $45^\circ$  к оси наибольшего сжатия. В высокопористых средах при больших давлениях этот угол превышает  $45^\circ$ . Нередко плоскость локализованного уплотнения ориентирована ортогонально оси наибольшего сжатия. Таким образом, структура и ориентация разломов могут зависеть не только от направления осей главных напряжений, но также от величины среднего напряжения и пористости среды. Принимая во внимание, что условия инициации и развития разрывов напрямую зависят от состояния среды и условий нагружения, интересно рассмотреть возможность развития деформации в разных режимах, а также изучить возможность протекания деформации в смешанных и переходных режимах.

Наиболее важная часть исследования при математическом моделировании процесса деформирования и построения модели процесса – формулировка определяющих соотношений. Эффективную прочность среды удобно представлять в виде поверхности предельного состояния (рис. 1), где по осям координат отложено эффективное давление и интенсивность касательных напряжений. Сложность описания поведения геоматериалов за пределом упругости состоит в том, что поверх-

ность (ограничивающая напряженное состояние, при достижении которой начинается развитие пластической деформации) разрушения среды не является фиксированной, она меняется в ходе деформирования. Кроме того, меняется коэффициент дилатансии, выражающий соотношение между приращениями сдвиговой и объемной частей пластической деформации, то есть направление вектора пластической деформации. Таким образом, параметры, описывающие поведение среды за пределом упругости, являются функциями от накопленной пластической деформации (ее объемной и сдвиговой частей) и давления. На рис. 1 приведены поверхности предельного состояния горных пород и их изменение в ходе: *a* – сдвиговой и *б* – объемной пластической деформации. Из рисунка видно, что в принятой модели сдвиговая прочность  $\tau$  зависит от давления  $\sigma$  и накопленной сдвиговой деформации  $\gamma^p$ , а пороговое давление  $\sigma_0$  есть функция пористости  $\phi$  или неупругой объемной деформации  $\epsilon^p$ , а коэффициент дилатансии зависит от действующего и порогового давлений.

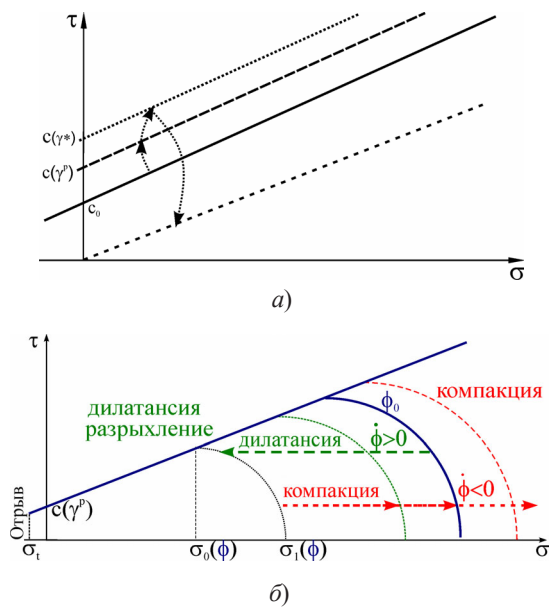


Рис. 1

Представлены результаты численного решения ряда задач, иллюстрирующих особенности поведения геоматериалов в различных условиях и формирование зон локализованной деформации на различных глубинах. На рис. 2 изображены: *a* – схема нагружения, *б* – полосы локализованного сдвига и *в* – уплотнения в пористом образце, *г* – полосы локализованного сдвига в горизонтальном сечении среды на глубине 1 км распределения неупругой объемной деформации. Показано, что в близких областях одновременно мо-

гут развиваться области локализованного сдвига с дилатансией и компакцией. Смена режимов деформирования с дилатансии на компакцию может быть вызвана не только изменением напряженного состояния, но и изменением свойств среды в ходе процесса, а именно с накопленной объемной деформацией. Формирование разрыва может быть заключительной стадией развития деформации, когда дилатансионный режим сменяется в узкой зоне компактированием и снижением эффективной прочности среды.

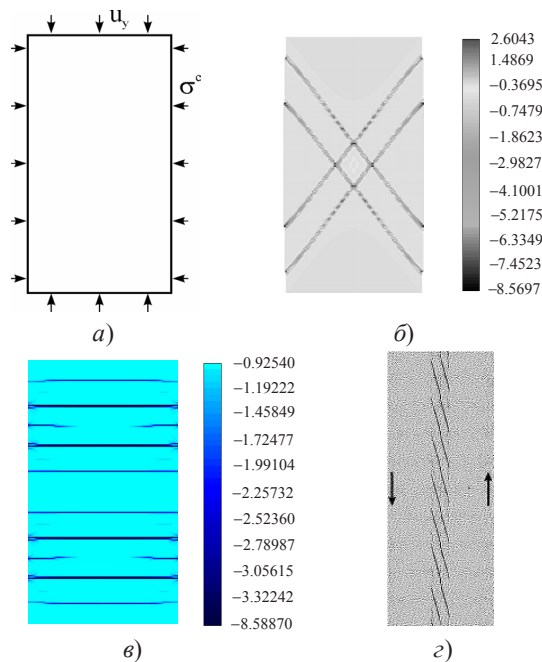


Рис. 2

Для моделирования процесса деформации геосреды использован подход [1], который основан на решении уравнений динамики упругопластической среды по явной численной схеме [2]. Описание деформации среды за пределом упругости осуществлялось в рамках модели [3], построенной на основе модифицированных моделей Друккера – Прагера – Николаевского [4, 5] и Рудницкого [6]. Процессы деформирования рассматривались в двухмерной постановке для условий плоской деформации.

При исследовании статических и динамических задач для тонкостенных конструкций, испытывающих изгибные деформации, важную роль играют так называемые локальные усилия, т.е. нагрузки, распределенные по малой части лицевой поверхности тела.

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант №10-05-00509а), проекта VII.64.1.8 фундаментальных исследований СО РАН на 2010-2012 годы и Интеграционного проекта СО РАН №114.*

## Список литературы

1. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физ. мезомех. 2005. Т. 8, №3. С. 129–142.
2. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
3. Стефанов Ю.П. Режимы дилатансии и уплотнения развития деформации в зонах локализованного сдвига // Физ. мезомех. 2010. Т. 13. Спец. вып. С. 11–19.
4. Друккер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 2. Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир, 1975. С. 166–177.
5. Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды // ПММ. 1971. Т. 35. Вып. 6. С. 1017–1029.
6. Grueschow E., Rudnicki J.W. Elliptic yield cap constitutive modeling for high porosity sandstone // Int. J. of Solids and Structures. 2005. V. 42. P. 4574–4587.

**DEVELOPMENT OF DEFORMATION IN ROCKS IN DILATATION AND COMPACTION MODES**

*Yu.P. Stefanov*

The results of numerical modeling of problems that illustrate the behavior of geomaterials under various conditions are presented. Deformation in dilatation and compaction modes is studied in the framework of a mathematical model with a combined yield surface and a non-associated flow law. Equations relating the yield surface and the dilatancy factor are proposed, taking possible consideration of changes of deformation modes. The influence of pressure and porosity of the medium on strain localization are studied. It is shown that the change in deformation modes can be caused not only by changing the stress state, but also change the properties of the medium during the process, namely, the accumulated volume strain.

*Keywords:* rocks, constitutive relations, dilatancy, compaction, localization, plastic deformation, porosity.