

2. Гордиенко Л.В. Описание топологических отношений объектов в геоинформационной системе при управлении материальными потоками // Межотраслевой институт «Наука и образование» Ежемесячный научный журнал. 2014. № 3. С. 26 – 27.

3. Представление и использование знаний / под ред. Х. Уэно, М. Исидзука; пер. с яп. И. А. Иванова под ред. Н. Г. Волкова. - М.: Мир, 1989.

4. Берштейн Л.С., Боженюк А.В. Введение в теорию нечетких графов: учеб. пособие. - Таганрог : Изд-во ТРТУ, 1999.

УДК 622.023.23:627.514:004

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОГРАЖДАЮЩЕЙ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

**А.И. Калашник**

кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Россия, e-mail: [kalashnik@goi.kolasc.net.ru](mailto:kalashnik@goi.kolasc.net.ru)

**Аннотация.** Разработана гидрогеомеханическая 3D модель ограждающей дамбы хвостохранилища, отличительной особенностью которой является принцип интегрирования геолого-геометрических, геомеханических и гидрогеологических условий. Это позволяет, наряду с геомеханическими расчетами, выполнять и гидравлические, а также оценку устойчивости дамбы. Результаты исследований модели на примере одного из крупных хвостохранилищ Кольского региона получили заверку данными комплексных натурных наблюдений и ежемесячного мониторинга.

**Ключевые слова:** *дамба, хвостохранилище, гидрогеомеханическая модель.*

## DESIGN OF COMPUTER HYDRO-MECHANICAL MODEL FOR TAILINGS EMBANKMENT DAM

**Anatoly Kalashnik**

PhD (Eng.), head of laboratory, Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russia; e-mail: [kalashnik@goi.kolasc.net.ru](mailto:kalashnik@goi.kolasc.net.ru)

**Abstract.** A hydro-mechanical 3D model has been designed for a tailings embankment dam, which distinguishing property is a principle of integrating geological-geometric, geomechanical and hydrogeological conditions. This allows both geomechanical and hydraulic calculations and a dam stability assessment. The model research results through the case study of a large tailing at the Kola region have been verified by the data of complex in-situ observations and monthly monitoring.

**Keywords:** *dam, tailing, hydro-mechanical model.*

**Введение.** Принципы применения информационных технологий для решения оперативных и стратегических задач освоения минеральных ресурсов Кольского региона были сформулированы в работах [1, 2]. При этом внимание в основном уделялось вопросам предметно-ориентированного моделирования на основе создаваемых баз горно-геологических и горно-технических параметров. Вместе с тем следует отметить, что создаваемые модели горнотехнических объектов, в частности, для решения задач прочности и устойчивости, исследовались в упругой постановке, на основе геометрических параметров, физико-механических свойств пород и внешних нагрузок. Это в достаточной мере является адекватным для массивов скальных пород, но для техногенно перемещенных и водонасыщенных пород необходимы соответствующие модели, которые должны исследоваться в упругопластической и упруго-вязко-пластической постановке, и должны учитывать, в комплексе с механическими, гидравлические условия.

В данной статье рассмотрены подходы к разработке компьютерной гидрогеомеханической 3D модели ограждающей дамбы на примере одного из крупных хвостохранилищ Кольского региона.

**Цель работы.** Известно, что характер распределения напряжений и перемещений в массивах породных грунтов и их величины зависят от многих факторов, но для ГТС хвостохранилища, представляющего собой массивы породных грунтов, насыщенных водой, уместно выделить следующие основные группы:

- геологическое строение подстилающих массивов породных грунтов;
- гидрогеологический режим района ГТС хвостохранилища;
- структура и инженерно-геологические свойства насыпных ограждающих дамб;
- физико-механические свойства породных грунтов ограждающих дамб и основания-подстилающего массива;
- гидростатические и гидродинамические характеристики системы «хвостохранилище-ограждающие сооружения – основание»;
- геометрические параметры хвостохранилища: объем, мощность хвостовых отложений и приповерхностной воды, конфигурация хвостохранилища в плане, высота и ширина ограждающих дамб, углы наклона склонов, рельеф района расположения хвостохранилища;
- наличие, параметры, ориентация и местоположение в подстилающем основании блочных геологических структур;
- силовые граничные условия: вес воды (уровень воды в хвостохранилище) и налегающих толщ пород, гидростатическое давление, гидродинамическое влияние, боковой отпор, эффективные напряжения, величина и направление основных водных масс района, давление грунтовых вод и т.п.

Учитывая вышесказанное и в целях, по-возможности, максимально большего учета факторов, разработана объемная гидрогеомеханическая 3D модель ограждающей дамбы хвостохранилища.

**Гидрогеомеханическая модель.** В разработанной гидрогеомеханической 3D модели ограждающей дамбы хвостохранилища реализован принцип интегрирования геолого-геометрических (геологические и пространственные характеристики породных грунтов), геомеханических (механические свойства и действующие нагрузки), гидростатических (степень водонасыщения породных грунтов, геометрический и пьезометрический напор, а также скоростной напор вследствие дренирования воды) (рис. 1а) и гидродинамических (образование зон фильтрации, скоростной напор и давление потока) (рис. 1б) условия. Это позволяет, наряду с геомеханическими расчетами (определение напряжений и деформаций в исследуемом объекте), выполнять и гидравлические (изменение уровня и давления дренирующейся воды, формирование зон повышенной фильтрации и развитие их во времени: увеличение поперечных размеров, повышение скорости и давления фильтрационного потока).

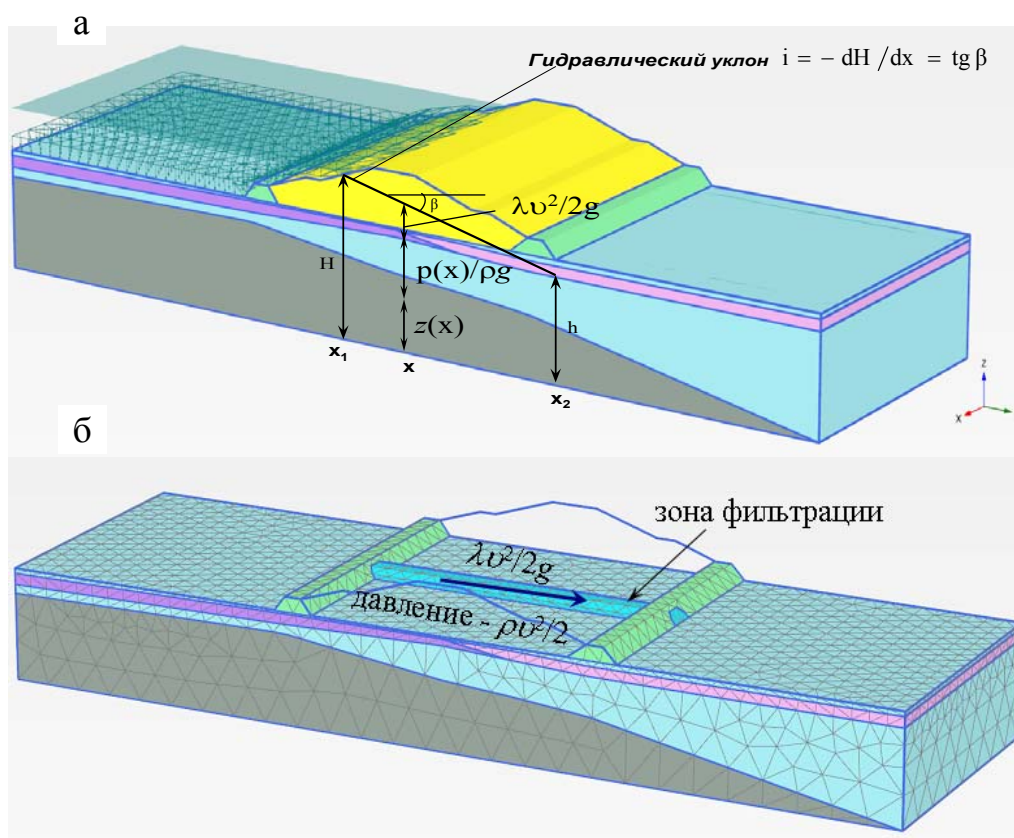


Рисунок 1 - Схема, отражающая учет в гидрогеомеханической модели 3D гидростатических (а) и гидродинамических (б) условий

Гидростатическое воздействие может быть описано графически уравнением Бернулли [3] (рис. 1а), где:  $H$  и  $h$  – высота уровня воды на верхнем и нижнем склоне, соответственно;  $z(x) = H-h$  – геометрический напор в сечении  $x$ ;  $p(x)/\rho g$  – пьезометрический напор;  $\lambda v^2/2g$  – скоростной напор дренирования;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $v$  – скорость дренирования воды;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\beta$  – угол гидравлического уклона;  $\rho$  – плотность воды;  $x$  – рассматриваемое сечение.

В случае формирования зон (условно «каналов») повышенной фильтрации, дополнительно генерируется гидродинамическое воздействие [4] (рис. 1б), которое имеет скоростные ( $\lambda v^2/2g$ ) и динамические ( $\rho v^2/2$ ) характеристики. Кроме того, гидродинамическое давление действует на стенки зоны повышенной фильтрации и, преодолевая силы тяжести грунта, приводит к его разжижению. При этом возможно вымывание грунта вместе с водой – механическая суффозия, вследствие чего увеличиваются поперечные размеры зоны фильтрации.

**Особенности модели.** Отличительной особенностью разработанной гидрогеомеханической 3D модели является дифференцированное использование для различных породных грунтов соответствующей модели (упругой, упругопластической, упруго-вязко-пластической, консолидационной) их деформирования (поведения под нагрузкой), принимаемой в соответствии с исходными гидрогеологическими данными (рис. 2).

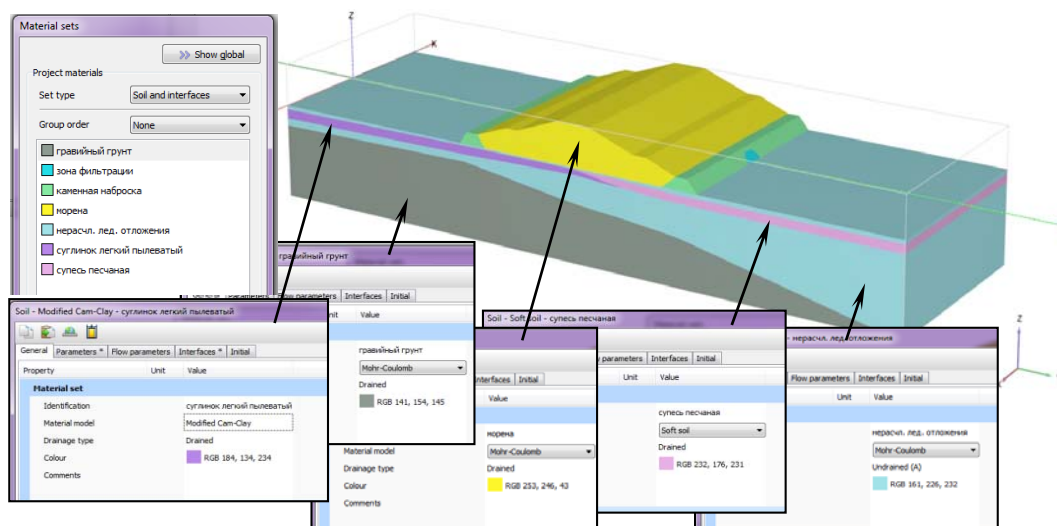


Рисунок 2 - Гидрогеомеханическая 3D модель ограждающей дамбы хвостохранилища

Это позволяет, наряду с геомеханическими расчетами (определение напряжений и деформаций в теле дамбы и подстилающем основании), выполнять и гидравлические (изменение уровня и давления дренирующей)

воды, формирование зон повышенной фильтрации и развитие их во времени: увеличение поперечных размеров, повышение скорости и давления фильтрационного потока).

**Верификация модели.** Компьютерные исследования разработанной гидрогеомеханической 3D модели ограждающей дамбы хвостохранилища выполнены применительно к одному из крупных хвостохранилищ Кольского региона. Верификация расчетных значений выполнялась на основе сопоставительного анализа с данными полевых наблюдений: георадарное зондирование, пьезометрические определения, геодезические измерения [5-7]. Установлено, что полученные расчетные результаты имеют хорошее подтверждение данными комплексных натурных наблюдений и ежемесячного мониторинга.

**Выводы.** Разработана гидрогеомеханическая 3D модель ограждающей дамбы хвостохранилища, отличительной особенностью которой является принцип интегрирования геолого-геометрических (геологические и пространственные характеристики породных грунтов), геомеханических (механические свойства и действующие нагрузки) и гидрогеологических (гидростатические и гидродинамические параметры) условий. Это позволяет, наряду с геомеханическими расчетами (определение напряжений и деформаций в исследуемом объекте), выполнять и гидравлические (изменение уровня и давления дренирующейся воды, формирование зон повышенной фильтрации и развитие их во времени: увеличение поперечных размеров, повышение скорости и давления фильтрационного потока). Отличительной особенностью разработанной модели также является дифференцированное использование для различных породных грунтов и степени их водонасыщения соответствующей модели их деформирования (поведения под нагрузкой): упругой, упругопластической, упруго-вязко-пластической, консолидационной. Результаты исследований модели на примере одного из крупных хвостохранилищ Кольского региона получили заверку данными комплексных натурных наблюдений и ежемесячного мониторинга.

*Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ № 15-05-05835.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калашник А.И. Методология применения информационных технологий при освоении минерально-сырьевых ресурсов Кольского полуострова / А.И. Калашник // Наука и образование. 10 лет вместе. – Апатиты: КНЦ РАН, 2005. – С. 132-139.
2. Козырев А.А. Информационные технологии в горном деле / А.А. Козырев, Н.Н. Чаплыгин, А.Д. Вассерман, О.Е. Чуркин, А.И. Калашник., и др. – Апатиты: КНЦ РАН, 1998. – 380 с.
3. Лурье М.В. Задачник по трубопроводному транспорту нефти, нефтепродуктов и газа / М.В.Лурье – М.: ООО Недра-Бизнесцентр, 2003. – 349 с.



4. Ландау Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц - М.: Наука, 1988. – 736 с.
5. Мельников Н.Н. Инновационные георадарные технологии изучения подповерхностной структуры и состояния природно-технических систем / Н.Н. Мельников, А.И. Калашник // Вестник Кольского научного центра РАН. – Апатиты, 2010. - № 3. - С. 4-8.
6. Данилкин А.А. Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа / А.А. Данилкин, А.И. Калашник, Д.В. Запорожец, Д.А. Максимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. - № 7. - С. 344-351.
7. Калашник А.И. Идентификация фильтрационно-деформационных процессов в теле ограждающей дамбы хвостохранилища / А.И. Калашник, Д.В. Запорожец, Н.А. Калашник // Вестник Кольского научного центра РАН. - 2013. - № 2. - С. 13-16.

УДК 622.271.63:627.514:004

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ОГРАЖДАЮЩЕЙ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

**Н.А. Калашник**

научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Россия, e-mail: [kalashnik@goi.kolasc.net.ru](mailto:kalashnik@goi.kolasc.net.ru)

**Аннотация.** На основе объемного моделирования ГТС хвостохранилища выявлены параметрические зависимости перемещений грунтов дамбы от ее геометрических и гидродинамических характеристик. Для оценки ее механической прочности и противofильтрационной функциональности предварительно определены значения надежности (безопасности). Полученные результаты предоставляют научную основу, например, для решения обратной задачи оценки устойчивости дамбы хвостохранилища по результатам геодезических и геометрических измерений.

**Ключевые слова:** хвостохранилище, моделирование, перемещения грунтов, надежность.

## COMPUTER MODELING OF MECHANICAL STRENGTH AND IMPERVIOUS FUNCTIONALITY OF TAILINGS EMBANKMENT DAM

**Nadezhda Kalashnik**

researcher, Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russia; e-mail: [kalashnik@goi.kolasc.net.ru](mailto:kalashnik@goi.kolasc.net.ru)

**Abstract.** 3D modeling of tailing's hydro-technical system was applied to reveal parametrical dependencies of a dam's soils movement upon its geometric and hydrodynamic characteristics. Values of reliability (safety) have been preliminary determined in order to assess the dam's mechanical strength and impervious functionality. The results obtained can