ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА ЗИФ РУДНИКА КУМТОР НА ОСНОВАНИИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ДЖАМАНБАЕВ М.Д., ЧУКИН Б.А.
КТУ им. Раззакова, ИГиОН НАН КР
izvestiya@ktu.aknet.kg

В статье приводятся результаты численного моделирования реологических процессов, происходящих в грунтах основания дамбы хвостохранилища. Выполнены прогнозные расчеты развития реологических процессов и произведена оценка общей устойчивости дамбы.

Возведение тела дамбы хвостохранилища рудника Кумтор началось в 1995 году. В 1999 году впервые были отмечены смещения в грунтах основания дамбы. Дальнейшие исследования показали, что смещения происходят в суглинистом прослое с содержанием льда до 50-60%. Необходимо было разработать инженерные мероприятия для остановки смещений дамбы. Одним из способов рассмотрения вариантов по остановке смещений является численное моделирование. Численное моделирование выполнено на основании программы FLAC.

Важным этапом численного моделирования является выбор модели грунта, описывающей связь между деформациями ползучести и релаксацией напряжений. В результате анализа различных моделей для описания реологических процессов в грунтах, выбор пал на степенную зависимость Нортона. Приведем основные этапы реализации степенной зависимости Нортона для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов.

Принимается, что начальное НДС известно, т.е. известными являются:

- тензор напряжений σ_{ij},
- тензор скорости деформации $\dot{\in}_{ij}$.

Вычисляется девиатор тензора напряжений σ_{ij}^{d} и $\dot{\in}_{ij}^{d}$ - девиатор скорости деформаций. По известному значению девиатора тензора напряжений σ_{ij}^{d} вычисляется инвариантное значение интенсивности напряжений:

$$\overline{\sigma} = (\frac{3}{2})^{1/2} (\sigma \frac{d}{ij} \sigma \frac{d}{ij})^{1/2} \qquad (1)$$

Интенсивность напряжений $\overline{\sigma}$ определяет значение градиента скорости деформации ползучести $\dot{\in}_{cr} = A\overline{\sigma}^{n}$, где A и n свойства материала. Это и есть степенная зависимость Нортона.

По известному значению градиента скорости деформации ползучести $\dot{\in}_{cr}$ и отношению девиатора тензора напряжений σ_{ij}^{d} к интенсивности напряжения $\overline{\sigma}$ вычисляют тензор скорости деформации ползучести $\dot{\in}_{ij}^{c}$ по выражению:

$$\dot{\in}_{ij}^{c} = (\frac{3}{2})\dot{\in}_{cr}(\frac{\sigma_{ij}^{d}}{\overline{\sigma}}) \qquad (2)$$

По известному значению девиатора скорости деформаций $\dot{\in}_{ij}^{d}$ и вычисленному тензору скорости деформации ползучести $\dot{\in}_{ij}^{c}$ вычисляют приращение девиатора скорости деформации $\dot{\in}_{ij}^{d} - \dot{\in}_{ij}^{c}$. Произведение приращения девиатора скорости деформаций $(\dot{\in}_{ij}^{d} - \dot{\in}_{ij}^{c})$ на удвоенное значение модуля сдвига $2G$ даст приращение девиатора тензора напряжений $\Delta\sigma_{ij}^{d}$ для данного шага по времени Δt.

$$\Delta\sigma_{ij}^{d} = 2G(\dot{\in}_{ij}^{d} - \dot{\in}_{ij}^{c})\Delta t \qquad (3)$$

Приращение девиатора тензора напряжений $\Delta\sigma_{ij}^{d}$ изменит значение девиатора тензора напряжений σ_{ij}^{d}, а приращение девиатора скорости деформации $(\dot{\in}_{ij}^{d} - \dot{\in}_{ij}^{c})$ изменит девиатор скорости деформаций $\dot{\in}_{ij}^{d}$ и все расчеты повторяются заново.

Объемные деформации приняты упругими. В связи с этим, приращение главных напряжений определяется через выражение:

$$\Delta\sigma_{kk} = 3K\Delta\in_{v} \qquad (4)$$

где K модуль объемной деформации и приращение объемных деформаций

$$\Delta\in_{v} = \Delta\in_{11} + \Delta\in_{22} + \Delta\in_{33} \qquad (5)$$

Расчет заканчивается по достижению заданного периода времени t.

В нашем случае, расчеты НДС с учетом реологических процессов основывались на калибровке модели так, чтобы результаты расчета смещений сближались с данными мониторинга за смещениями. При отсутствии лабораторных исследований по определению реологических параметров суглинистого грунта методология сближения результатов расчета с данными мониторинга за смещениями является единственно оправданной. При этом отмечаем, что если бы и были результаты лабораторных исследований, то подход калибровки модели оставался бы наиболее достоверным, так как основывался на сближении результатов расчета с реальными данными за смещением.

Наблюдения за смещениями производились на основании инклинометров. Для составления реологической модели были выбраны показания INC98-1 (98 – год установки инклинометра, 1 - порядковый номер инклинометра, установленного в 1998 году).

Выбор основывался на следующих обстоятельствах:

- INC98-1 расположен на участке, где суглинистый прослой в последующем не был удален;
- INC98-1 имеет наиболее длинный ряд натурных наблюдений: с 3 апреля 1999 по 21 декабря 2001 и с 4 сентября 2003 по 13 августа 2005 г.;
- другие инклинометры, установленные взамен INC98-1 или на других участках, можно использовать для оценки правильности составленной реологической модели и работоспособности дамбы в целом.

На рис.1 представлены наблюдаемые смещения по показаниям INC98-1. По вертикальной оси отложена глубина в метрах от гребня дамбы. По горизонтальной оси - величина суммарных смещений в миллиметрах. Из рисунка видно, что наиболее интенсивно смещения происходят между отметками 22 м и 24 м. Так как глубина отметок по мере наращивания инклинометра меняется, удобнее «привязать» отметки 22 м и 24 м к уровню естественной поверхности. Уровню естественной поверхности соответствует отметка 20 м. В таблице 1 приводится соответствие отметок реальной глубине залегания слоев суглинистого прослоя и его мощность.

Таблица 1.

Отметка по INC98-1, м	Глубина залегания слоя от естественной поверхности, м	Мощность прослоя, м
22	2	0
22.5	2.5	0.5
23.0	3.0	1.0
23.5	3.5	1.5
24.0	4	2.0

Согласно результатам инженерно-геологических изысканий, проведенных в 2006 году, суглинистый прослой имеет различные значения мощности. Мощность колеблется в пределах от 6 до 10 метров. Наибольшие деформации сдвига наблюдаются в верхней части суглинистого прослоя в пределах 2 метров.

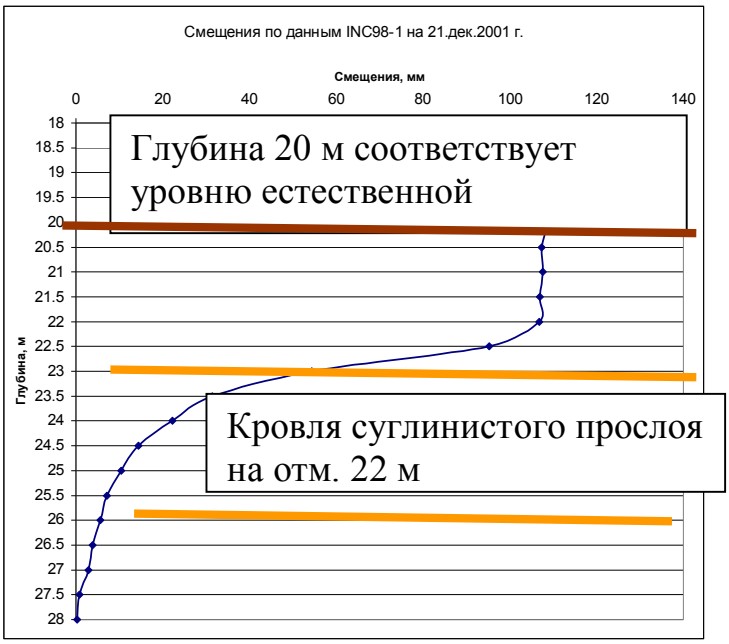

Рис.1. Картина распределений смещений по глубине.

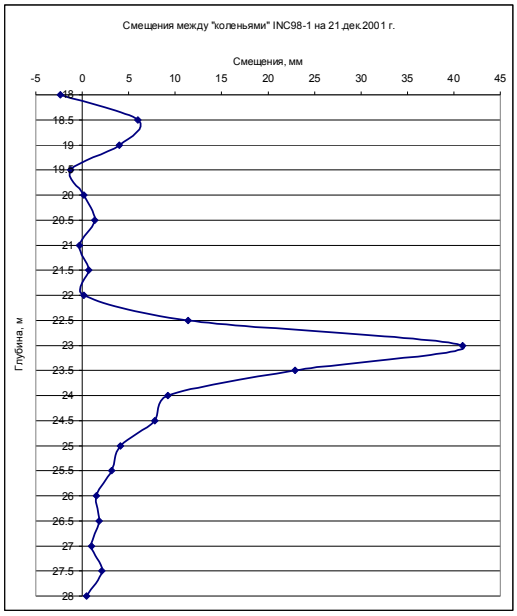

Рис. 2. График интенсивности деформаций сдвига в верхней части суглинистого прослоя.

Обращаем внимание, что кровля суглинистого прослоя, расположена на глубине 2 м от естественной поверхности. Все показания по смещениям выше этой отметки практически одинаковые. То есть, тело дамбы, а также 2-х метровый слой естественного грунта выше суглинистого прослоя испытывают меньшие деформации сдвига. Для того, чтобы выяснить: на каких глубинах и с какой интенсивностью происходят деформации сдвига, был построен график смещений «колен» инклинометра относительно друг друга. Качественная картина распределения деформаций сдвига в суглинистом прослое представлена на рис.2.

Из графика видно, что наибольшие деформации сдвига отмечаются на глубине от 2.5 до 4 м (отметка 22.5-24 м). Тем самым, наиболее деформируемый слой имеет мощность порядка 1.5 метра. Ниже 4 м (отметка 24.0 м) деформации сдвига равномерно снижаются.

Составление реологической модели базируется на выделении расчетных реологических слоев в пределах всего суглинистого прослоя мощностью 9 м и подборе реологических параметров для каждого расчетного слоя так, чтобы максимально точно описать картину наблюдаемых смещений по данным INC98-1. Ввиду того, что смещения в суглинистом прослое проходили еще до того, как был установлен INC98-1, необходимо попытаться восстановить накопленные смещения с начала строительства дамбы.

Данные мониторинга по INC98-1 разбиты на два временных периода: с 03.04.1999 по 21.12.2001 и с 04.09.2003 по 13.08.2005. За начало строительства мы приняли дату 01.01.1995. Дата начала строительства может быть и иной, но даже сдвиг на 1 год вперед (1996) приведет к искажению результатов смещений всего на 5 см. Но главное - он не приведет к искажению значений разности смещений между расчетными слоями. Разность в смещениях между слоями определяет величину деформаций сдвига и является наиболее важным для оценки устойчивости. На рис. 3 приводятся восстановленные графики смещений по выделенным слоям суглинистого прослоя на основании данных мониторинга. Обращаем внимание, что аппроксимация результатов наблюдений линейной регрессионной моделью дает высокую адекватность линейной модели. На рис.3 приведен результат аппроксимации смещений слоя, находящегося на глубине 2 м с коэффициентом детерминации R^2 =0.995 [1]. Такие же результаты получены для смещений, происходящих в других слоях. Практически смещения слоев на этапах наращивания дамбы в период с 1999 года по 2005 год происходят по линейному закону.

Калибровка модели производилась за счет вариаций параметра **A.** Параметр n принят постоянным и равным 3. Путем варьирования параметра **A** добивались сближения результатов расчета с реальными данными за смещением.

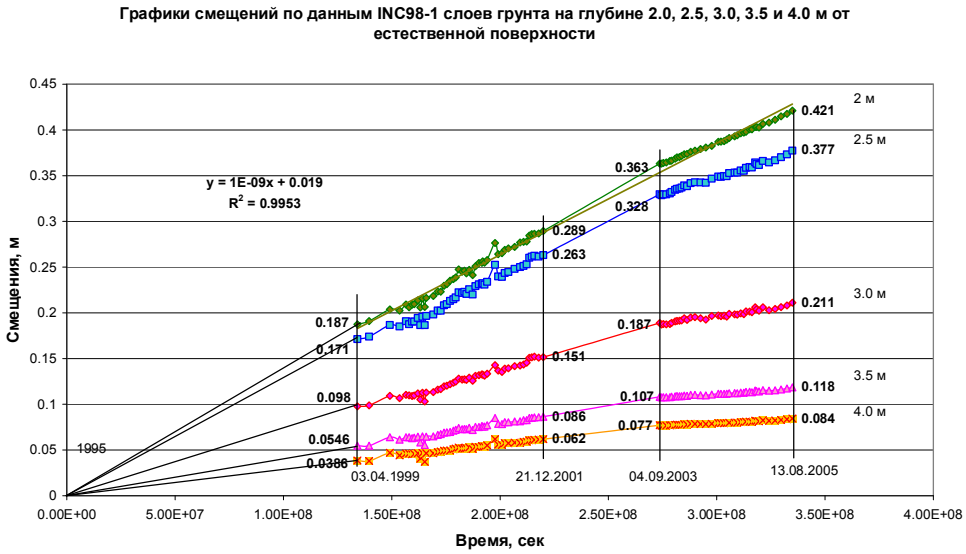

Рис.3. Графики смещений слоев суглинистого прослоя, находящихся на различных глубинах от естественной поверхности основания.

Наиболее точная аппроксимация результатов смещений в суглинистом прослое получилась по реологической модели, состоящей из 5 расчетных слоев. Необходимо подобрать параметры **A** для реологической модели так, чтобы можно было решать прогнозную задачу. То есть можно было бы решить задачу расчета НДС на основании хорошего сближения с данными мониторинга, без дальнейших изменений показателя А. Нам удалось этого добиться путем поэтапной калибровки моделей 1996, 1997, 1999, 2001, 2002 и 2004 годов. На рис.4 приведен фрагмент реологической модели на конец 2004 года. Реологическая модель 2004 года является окончательной. После этого изменения в показатели ползучести **A** для всех этапов наращивания дамбы, наполнения хвостохранилища, а также строительства клина в 2006 и 2009 году не вводились. Окончательные значения показателя А для всех расчетных слоев показаны на рис.4.

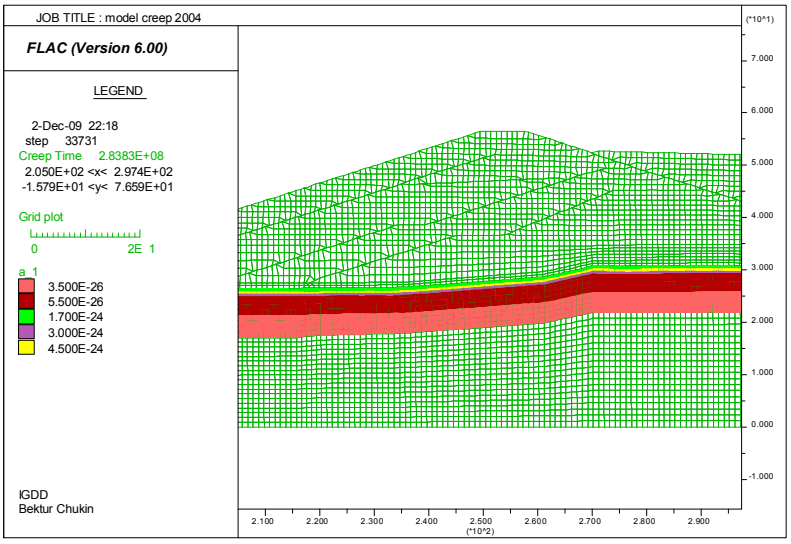

Рис. 4. Расчетные слои основания дамбы реологической модели 2004 г.

На рис.5 показаны графики сопоставления результатов расчета горизонтальных смещений с данными наблюдений по INC98-1 до 2004 года включительно.

Достаточно хорошее совпадение результатов расчетов с данными мониторинга было получено по основным смещающимся слоям, находящимся на глубинах 22.5 м, 23.0 м и 23.5 м.

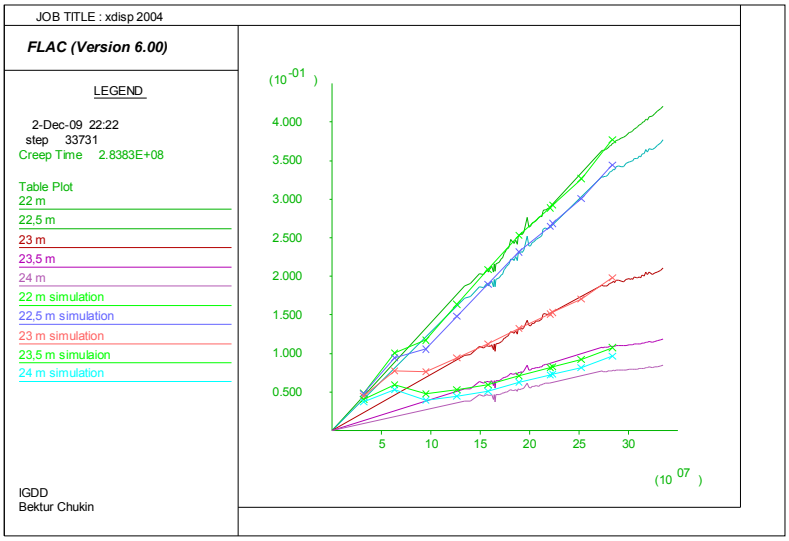

Рис. 5. Сопоставление результатов расчета с данными мониторинга за смещениями по данным INC98-1 на 2004 г.

Калибровка 2004 года была связана с тем, что на 2008 год в графиках смещений наблюдается некоторое отклонение от линейного характера смещений. Именно корректировка значения показателя А в среднем слое в 2004 году позволила нам добиться наилучшего приближения. Ввиду того, что в последующих моделях не производилось корректировки показателя А, можно считать, что все последующие расчеты носят прогнозный характер. Остановимся на результатах расчета, полученных на 2009 год. На рис.6 показаны результаты прогноза горизонтальных смещений по слоям до 2009 года включительно.

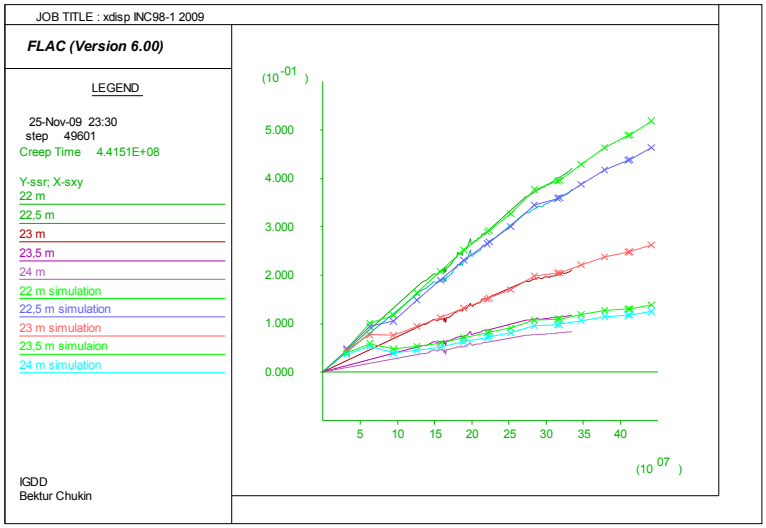

Рис.6. Результаты прогноза горизонтальных смещений по слоям до 2009 г.

Необходимо отметить, что в расчетах учитывались экскавационные работы 2003, 2006 и 2009 годов по строительству клина.

Суглинистый прослой, простирающийся под телом дамбы и до клина 2003 года удалить уже невозможно. Также невозможно удалить грунты в основании между клиньями 2003 и 2006 годов. Не удаленный суглинистый прослой оказывает самое существенное влияние на общий характер распределения смещений в дамбе и основании. Основной особенностью в характере распределения горизонтальных смещений является то, что смещения в суглинистом прослое на участках под дамбой продолжаются, а смещения на участках, где был удален суглинистый прослой и заменен на крупнообломочные грунты, останавливаются. На рис. 7 представлена общая картина горизонтальных смещений на конец 2009 года.

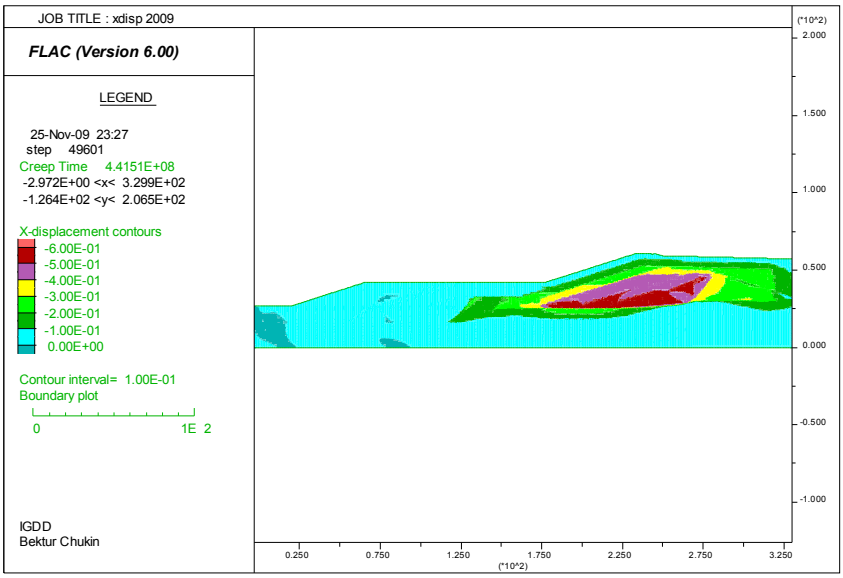

Рис.7. Общая картина горизонтальных смещений на конец 2009 года.

Наибольшие горизонтальные смещения сконцентрировались на участке, где суглинистый прослой удалить невозможно. На этом участке суммарные горизонтальные смещения к концу 2009 года не превышают 60 см. Область, где суглинистый прослой был удален и построен клин, горизонтальные смещения не превышают 10 см. То есть, происходит сжатие грунтов между клином 2006 г. и смещающимся телом дамбы по суглинистому прослою. Это говорит о том, что проводимые мероприятия по остановке смещений дамбы за счет деформаций, вызванных реологическими процессами в суглинистом прослое, себя оправдывают.

После описания общего деформационного состояния дамбы и грунтов основания необходимо ответить на основной вопрос. Являются ли данные распределения горизонтальных смещений опасными для состояния дамбы? Может ли произойти обрушение низового откоса при данных смещениях? Вопрос, как рассчитать коэффициент устойчивости геотехнического объекта при моделировании реологических процессов остается открытым. Для оценки общей устойчивости мы предлагаем следующий подход.

Основной отличительной особенностью от ранее выполненных расчетов устойчивости дамбы является то, что мы теперь учитываем изменение прочностных свойств грунтов суглинистого прослоя от величины деформаций сдвига, полученного в результате моделирования реологического процесса. То есть устойчивость дамбы оценивается с учетом фактора времени. Л. Шукле отмечал: «Прочность грунта может быть оценена … по предельной величине деформации сдвига…» [2]. М.Н. Гольдштейн после проведения серий испытаний с глинистыми грунтами на ползучесть установил, что потеря грунтом прочности определяется величиной критической деформации, независимо от длительности проявления ползучести, соответствующей данному напряженному состоянию грунта [3,4]. Это позволяет сделать два очень важных вывода, которые легли в основу расчета коэффициента устойчивости:

1. Если сооружение подвержено незатухающим реологическим процессам, то момент наступления потери устойчивости сооружения будет определяться не временем проявления реологических процессов, а формированием поверхности обрушения, вдоль которой грунт достигает критической деформации сдвига.
2. Так как реологические процессы деформации сдвига в различных точках сооружения различны, общую устойчивость сооружения необходимо оценивать на основании распределения деформаций сдвига с определением участков, где деформации сдвига достигли предельных значений.

Ю.К. Зарецкий [5] отмечает, что для грунтов существует предельная деформация формоизменения, которая является паспортной величиной для грунта. На основании экспериментов с супесью для Нурекской плотины интенсивность деформаций составила 14% . Н.Н. Маслов отмечал, что при достижении деформаций сдвига порядка 13-16 %, связный грунт

больше не сопротивляется сдвигу [3]. Данное обстоятельство для оценки устойчивости при расчетах на ползучесть нами реализовано следующим образом. Если необходимо оценить устойчивость дамбы в конкретный период времени, то мы определяем область в суглинистом прослое, в которой величина деформаций сдвига достигла предельных значений. За предельное значение принята величина деформации сдвига 13%. Это значение выбрано как минимальное из всех приведенных в литературных источниках. Принимается, что вся эта область больше не сопротивляется сдвигу [6-9]. В этой области прочностные свойства суглинистого прослоя приравниваются C=0 и φ=0. То есть прочностные значения таковы, что грунты вообще не сопротивляются сдвигу.

На рис.8 представлена картина распределения максимальных деформаций сдвига в теле дамбы и основании на 2009 год. Наибольшие деформации сдвига сосредоточились в суглинистом прослое. Также деформации сдвига отмечаются по слоям, соответствующим этапам возведения.

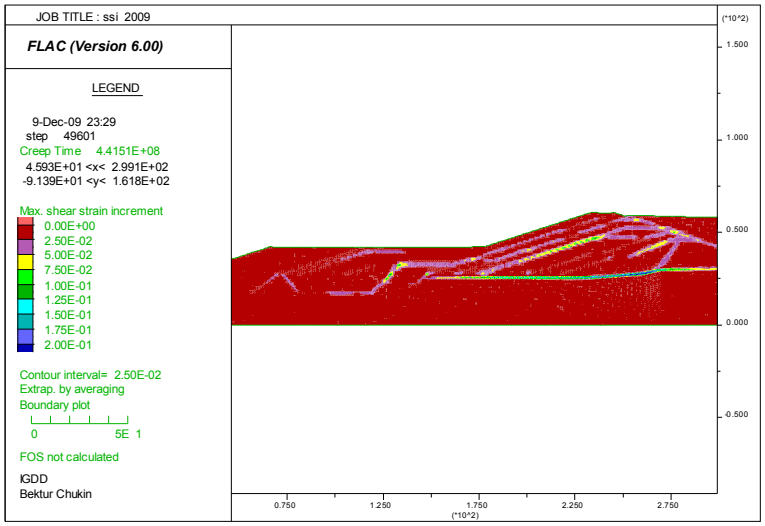

Рис.8. Картина распределения максимальных деформаций сдвига в теле дамбы и основании на 2009 г.

Для точного выделения области, в которой грунт более не сопротивляется сдвигу, была составлена FISH функция. Эта функция автоматически присваивает нулевые значения прочности для областей, в которых максимальные деформации сдвига в суглинистом прослое достигли значений 0,13. В качестве примера, на рис. 9 представлена картина распределения угла внутреннего трения. Тем самым, была получена модель с распределенными значениями прочности.

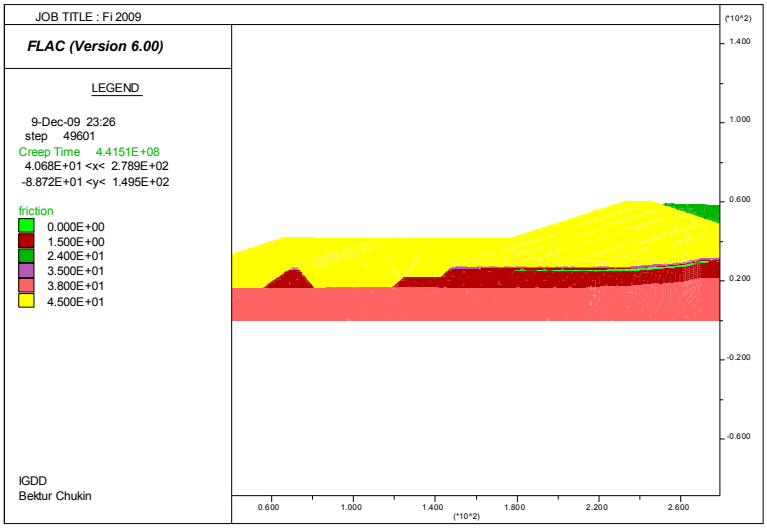

Рис. 9. Распределение области, в которой грунт более не сопротивляется сдвигу.

Использовали стандартную процедуру расчета коэффициента устойчивости, предложенную Dawson и Roth 1999 г. и основанную на вычислении отношения реальных значений прочности к значениям прочности, при которых сооружение теряет устойчивость. На рис. 10 представлена картина распределения поверхности сдвига с минимальным значением коэффициента устойчивости Ку=1,39 при нормативном значении $Ку^{н}$=1.20.

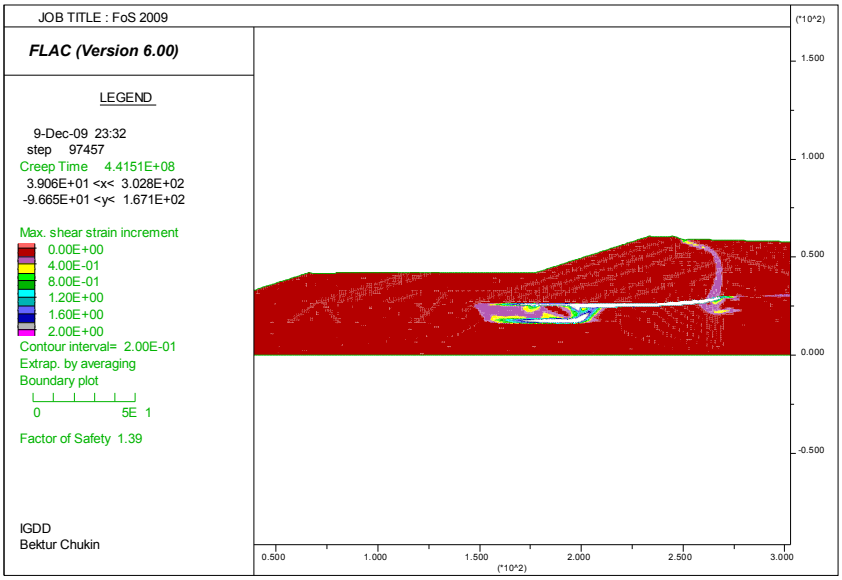

Рис. 10. Картина распределения поверхности сдвига с минимальным значением коэффициента устойчивости Ку=1,39 (2009 г.).

Отмечаем, что поверхность сдвига не имеет выхода на свободную поверхность и не образует замкнутую область.

Выводы

Для описания реологических процессов, происходящих в грунтах суглинистого прослоя дамбы хвостохранилища рудника Кумтор, была использована степенная зависимость, предложенная Нортоном. Калибровка модели на основании зависимости Нортона дала высокую степень сближения результатов расчета с данными мониторинга за смещениями. Получены следующие результаты:

1. Разработана методология подбора реологических параметров для многослойной модели суглинистого прослоя с возможностью проведения прогнозных расчетов.
2. Выявлено, что результаты наблюдений по данным инклинометров за горизонтальными смещениями в суглинистом прослое описываются линейной регрессионной моделью. Фактически, горизонтальные смещения слоев суглинистого прослоя на этапе строительства и наращивания дамбы с 1999 по 2005 годы подчиняются линейному закону.
3. Анализ данных мониторинга за горизонтальными смещениями показал, что наиболее интенсивно смещаются верхние слои суглинистого прослоя мощностью порядка 1.5-2.0 м, расположенные на глубине 2 м от естественной поверхности. Общая мощность слабых суглинистых грунтов равна примерно 10 м.
4. Данные мониторинга и результаты численного моделирования показали, что неудаленный суглинистый прослой под дамбой определяет картину распределения горизонтальных смещений в теле дамбы и грунтах основания. Замена грунтов суглинистого прослоя на крупнообломочные грунты, произведенная в 2006 и 2009 годах, привела к замедлению скоростей горизонтальных смещений в районе строительства клиньев. Максимальная скорость горизонтальных смещений в теле дамбы на конец 2009 г. составляет 3.5 см/год. Минимальная скорость горизонтальных смещений в теле клина и пригрузочной призме на конец 2009 г. составляет 0.25 см/год. Максимальная величина горизонтального смещения в суглинистом прослое на конец

2009 г. составила порядка 55 см. Максимальная величина горизонтального смещения, как в клине 2006 г., так и в клине 2009 г. не превышает 5 см.

5. Для оценки устойчивости дамбы в условиях продолжающихся реологических процессов в неудаленном суглинистом прослое в качестве критерия потери несущей способности суглинистого грунта была выбрана предельная величина деформации сдвига, равная 13%. В тех участках суглинистого прослоя, в которых величина деформации сдвига достигла 13%, прочностные значения приравнивались к нулю: C=0 и φ=0.
6. Коэффициент статической устойчивости дамбы на период 2008 года составил Ку=1.44, а на период 2009 г. после окончания строительных работ Ку=1.39, при нормативном $Ку^{н}$=1.20.
7. Составленная реологическая модель позволит моделировать напряженно-деформированное состояние и оценивать работоспособность дамбы на последующие этапы возведения и в период эксплуатации дамбы и, в случае необходимости, принимать обоснованные решения, направленные на безопасную эксплуатацию дамбы хвостохранилища рудника Кумтор.

Литература

1. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. – Санкт-Петербург: Питер, 2003. – 730 с.
2. Шукле Л. Реологические проблемы механики грунтов / Сокр. пер. с англ. Маслова Н.Н. Изд.2-е. М.: Стройиздат, 1976. - 485 с.
3. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1982. – 511 с.
4. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. – М., т.1-3, 1979.
5. Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н. Статика и динамика грунтовых плотин. – М.: Энергоатомиздат, 1983.- 256 с.
6. Тер-Мартиросян Э.Г. Прогноз механических процессов в массивах многофазных грунтов. - М.: Недра, 1986. - 292 с.
7. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
8. Месчан С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. - М.: Недра, 1985. - 342 с.
9. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. – Ростов, Издательство Ростовского университета, 1989. - 608 с.