УДК 624.131

Н.С. Бас, В.Н. Костин

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрены проблемы расчета устойчивости откосного сооружения. Результаты данных расчетов необходимы для проектирования мероприятий по предотвращению оползней и дальнейших работ в данной местности. Максимально точные результаты требуют данные множества не связанных датчиков. Их систематизация и обработка является главной целью создания данного программного обеспечения. Проанализированы бизнес-процессы предметной области средствами методологии IDEF0 (модели существующей организации процесса AS-IS и будущей TO-BE, после внедрения ПО). Сформированы требования, предъявляемые к разработке ПО, по средствам диаграмм языка моделирования UML. Рассмотрены методы расчета устойчивости откосных сооружений, а именно: методы суммирования по круглоцилиндрическим и монотонным криволинейным поверхностям и методы многоугольника сил. На основе анализа выработанных требований разрабатывается рабочий прототип ПО расчета устойчивости откосного сооружения.

Ключевые слова: расчет устойчивости откосного сооружения, горные породы, горнодобывающая промышленность, суммирования по круглоцилиндрическим и монотонным криволинейным поверхностям, метод многоугольника сил.

Введение

Массив горных пород на карьере представляет собой динамическую систему, основные элементы которой – борта карьеров и отвалов изменяются в пространстве и во времени. На устойчивость данной системы влияет климатические условия формирующие влажностный режим района, определяя тем самым поведение горных пород в откосах [1]. Потеря устойчивости приводит к оползням, представляющих опасность для населенных пунктов близ разрабатываемого района, целостности построек, а также способствует нарушению технологических процессов в горнодобывающих предприятиях.

Методы расчета устойчивости откосов позволяют в количественной форме установить влияние различных процессов

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 33–46.
© 2016. Н.С. Бас, В.Н. Костин.

на состояние массива горных пород и оценить эффективность мероприятий по снижению их негативной роли [2].

В рамках данной работы исследованы актуальность автоматизированной поддержки процесса расчета устойчивости конструкции откосного сооружения, процессы требующие автоматизации, пути их автоматизации, а также проектирование и разработка программного обеспечение (далее ПО) автоматизирующие эти процессы.

Актуальность

Горнодобывающая промышленность является одной из ведущих отраслей глобальной экономики. За последние десятилетие данная отрасль значительно укрепила свои позиции на мировом рынке (таблица 1 [4]).

Рост прибыли в горнодобывающей отрасли ведет к расширению территорий доступных для исследования и выработки. Климатические условия и особенности грунта новых осваиваемых районов способствуют формированию новых требований, предъявляемых к проектированию конструкций вырабатываемых сооружений.

При проектировании карьеров, отвалов, хвостохранилищ всегда актуальной остается задача определения наиболее эффективных параметров откосов этих горнотехнических сооружений, обеспечивающих экономичность и безопасность производства [3].

Большинство из исследований геологи проводят на месте или в лабораториях на специализированном оборудовании. Но расчет многих характеристик грунтового массива и обработка материалов проведенных инженерно-геологических изысканий по-прежнему происходит вручную. Следовательно, встает вопрос о качественной и точной обработке информации, по-

Таблица

Доход горнодобывающей промышленности в период 2002–2010 гг.

Показатель	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Выручка, млрд долл.	93	110	184	222	249	312	349	325	435
Читая прибыль, млрд долл.	6	12	28	45	66	80	57	49	110
Норма чистой прибыли, %	6	11	15	20	27	26	16	15	25

лученной при исследовании, создании единой системы, позволяющей с высокой точностью проводить необходимые расчеты устойчивости откосных сооружений.

Бизнес-процессы предметной области

После определения актуальности исследуемой темы, построим функциональные модели организации процесса расчета устойчивости откосного сооружения (в частности, карьерного откоса) в соответствии с методологией IDEF0. Существующая организация процесса отражена в модели AS-IS (рис. 1, 2).

На рис. 1 представлены компоненты и необходимый персонал для проведения анализа и расчетов устойчивости карьерного откоса. По итогам формируется отчет с подробным представлением карьерного откоса и результатов расчета устойчивости.

На рис. 2 представлен результат декомпозиции процесса расчета устойчивости карьерного откоса. Анализ карьерного откоса базируется на последовательной обработке информации ответственного персонала: от подготовки отчета в соответствии со стандартами вплоть до оформления отчета.

Недостатками данной организации процесса являются:

- относительно малый набор методов расчета;
- отсутствие возможности построения эпюры избыточного оползневого давления;
- отсутствие возможности анализа корректности оконтуривания оползня;

Рис. 1. Функциональная модель AS-IS существующего процесса расчета устойчивости карьерного откоса

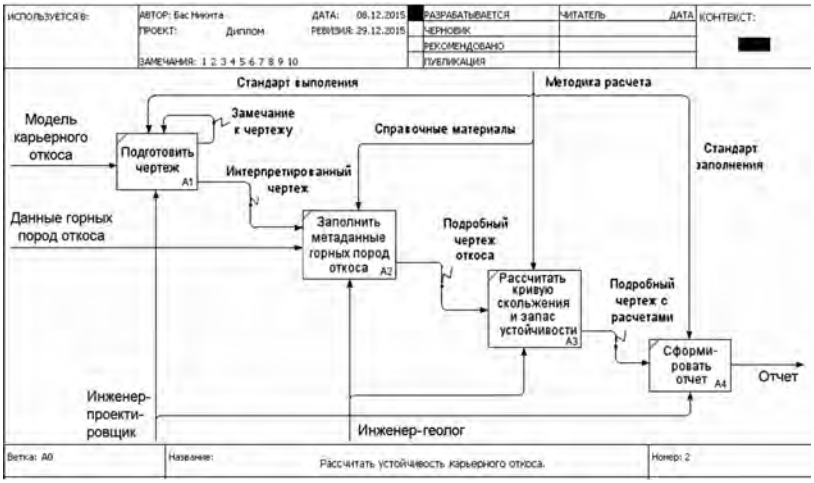

Рис. 2. Декомпозиция процесса расчета устойчивости карьерного откоса (Модель AS-IS)

• отсутствие полноценной базы данных визуализации в цветовой шкале и метаданных текстуры для последующего использования в подобных анализах.

Для решения имеющихся проблем поставлена задача проектирования и разработки многофункционального программного обеспечения, внедрение которого предполагает реорганизацию процесса анализа карьерного откоса. Реализация данного ПО представлена в модели TO-BE (рис. 3, 4, 5).

Рис. 3. Функциональная модель TO-BE расчета устойчивости карьерного откоса

Рис. 4. Декомпозиция процесса анализа карьерного откоса (модель TO-BE)

Как видно на рис. 3 внедрение программного обеспечения способствовало сокращению необходимого персонала, задействованного при расчете устойчивости карьерного откоса, и тем самым повысить отказоустойчивость процесса в целом.

На первом уровне декомпозиции (рис. 4) прослеживается возросший объем обрабатываемых исходных данных, сокращение времени обработки и передачи результатов.

Существенной декомпозиции подвергся блок «Произведения расчетов» (рис. 5). Процесс приобрел расширенный функ-

Рис. 5. Декомпозиция блока «Провести анализ и необходимые расчеты» (модель TO-BE)

ционал. Пользователю (в данном случаем Инженер-геолог) предоставляется возможность выбора необходимых методов расчета устойчивости, на основе результатов которых в дальнейшем будут планироваться противооползневые мероприятий и дальнейшие выработки в данной местности.

Итогом реализации разрабатываемого ПО является расширение функциональности процесса анализа карьерного откоса, сокращение численности необходимого экспертного персонала и человеческого фактора, увеличение точности и отказоустойчивости процессов расчета и информативности результатов работы.

Математическое обеспечение

В инженерной практике, при расчете устойчивости откосного сооружения, широко распространено использование двух основных групп методов:

- методы суммирования по круглоцилиндрическим и монотонным криволинейным поверхностям;
- метод многоугольника сил.

Применяются также комбинация этих методов [1]. Далее подробно рассмотрим каждый из методов.

Методы суммирования по круглоцилиндрическим монотонным криволинейным поверхностям

Метод Феллениуса достаточно подробно рассмотрен в литературе и часто применяется на практике. Этот метод используется для анализа призм только с кругло-цилиндрической поверхностью скольжения.

Метод не предполагает взаимодействия между отсеками и обеспечивает выполнение суммарного уравнения моментов, а также уравнения равновесия в каждом отсеке в проекции на нормаль к основанию.

Коэффициент устойчивости определяется из следующего соотношения:

$$K_y = \frac{\sum M_{реакт}\left(K_y\right)}{\sum M_{акт}},$$

где $K_у$ – коэффициент устойчивости, $\sum M_{реакт}$ – суммарный момент сил сопротивления сдвигу, $\sum M_{акт}$ – суммарный момент внешних активных сил.

Выражение есть нелинейное алгебраическое уравнение относительно $K_у$, решение которого получается с применением итерационных методов.

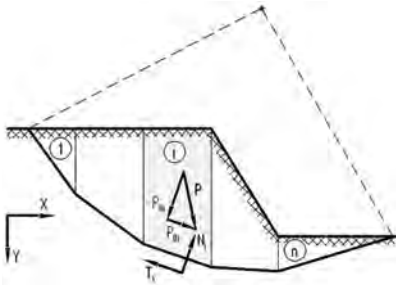

Рис. 6. Призма сдвига

При вычислении сил сопротивления необходимо определить силу нормальной реакции основания для каждого отсека. В рамках данного метода для вычисления используется уравнение равновесия сил в проекции на нормаль к основанию.

Все внешние активные силы (вес грунта в отсеке, внешняя нагрузка и т.д.), действующие на i-й отсек, приводятся к равнодействующей P_i. Последняя раскладывается на составляющие: нормальную N_i и касательную T_i к плоскости основания отсека. В случае отсутствия армирующих элементов уравнение равновесия в проекции на нормаль к основанию принимает вид (рис. 6):

$$S_i = N_i$$

Метод Янбу требует выполнения суммарного уравнения равновесия в проекции на горизонтальную ось, а также уравнения равновесия в каждом отсеке в проекции на вертикаль.

Все внешние силы, действующие на i-й отсек, приводятся к равнодействующей P_i. Последняя раскладывается на горизонтальную P_{xi} и вертикальную P_{yi} составляющие. Общее уравнение равновесия в проекции на горизонтальную ось примет вид:

$$\sum P_{xi} + \sum S_i \sin(\alpha_i) - \frac{\sum R_i}{K_y}\cos(\alpha_i) = 0$$

где S_i – сила нормальной реакции основания в i-м отсеке; $R_i = S_i \operatorname{tg}(\varphi_i) + C_i\, l_i$ – максимальное значение силы сопротивления сдвигу; a_i – угол наклона основания отсека.

Общая формула метода:

$$K_y = \frac{\sum P_{xi}\left(K_y\right)\cos(\alpha_i)}{\sum P_{xi} + \sum S_i\left(K_y\right)\sin(\alpha_i)}$$

Результатом является нелинейная алгебраическая задача относительно K_y, решение которой выполняется с применением итерационных методов [6].

Недостатком метода круглоцилиндрической поверхности скольжения и алгебраического сложения сил по монотонной криволинейной поверхности является занижение величин нор-

мальных напряжений в области призмы активного давления и завышение в области призмы упора вследствие неучета реакций между смежными блоками [1].

Метод многоугольника сил

Наиболее универсальным и в то же время математически обоснованным является метод многоугольника сил (метод векторного разложения сил).

В этом методе используются сосредоточенные силы, действующие по площадкам, разграничивающим смежные блоки массива, заключенного между линией скольжения и контура откоса.

Для откоса, находящегося в устойчивом состоянии с заданным коэффициентом запаса, многоугольник сил, построенный по наиболее напряженной поверхности скольжения для всей призмы возможного обрушения, должен замыкаться. Это означает, что его устойчивость обеспечивается с коэффициентом запаса, близким к введенному в прочностные характеристики пород.

Реакция между блоками определяется аналитически по формуле:

$$E_i = \frac{\eta * P_i \sin a_i - P_i \cos a_i tg\varphi_i}{\cos\delta_i + \sin\delta_i * tg\varphi_i} + E_{i-1}$$

где P_i – масса пород в пределах блока; a_i – угол наклона основания блока; $\delta_i = a_i - a_{i+1}$ – угол наклона реакции к основанию i-го блока.

При уменьшении угла δ знаменатель формулы стремится к единице.

Решая это уравнение при знаменателе, равном единице последовательно для всех блоков, и приняв для последнего блока, выводится следующее равенство [1]:

$$E_n = \eta\sum_1^n P_i \sin a_i - \sum_1^n P_i \cos a_i * tg\varphi_i - \sum_1^n C_i l_i$$

Аппаратно-программное обеспечение

На следующем этапе проектирования ПО необходимо рассмотреть его спецификацию, варианты использования, взаимодействие с внешней средой и аппаратную структуру развертывания. Для этого используется возможности языка моделирования UML (Unified Modeling Language) [5].

На рис. 7 представлены все возможные варианты использования ПО. Особое внимание требует уделить процессу «Расчет

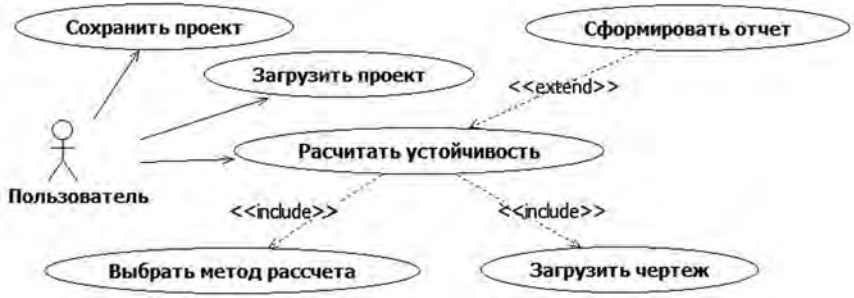

Рис. 7. Диаграмма вариантов использования «Use Case»

устойчивости». Данный процесс подразумевает совокупность двух подпроцессов – «Загрузить чертеж» и «Выбрать метод расчета», выполнение которых строго обязательно для достижения поставленной цели.

Для представления состояний, в которых находится ПО во время функционирования, была построена диаграмма состояний «Statechart» (рис. 8). Данная диаграмма представлена в виде графа переходов.

Последовательность перехода из состояния в состояние обусловлено следующими условиями:

• Если инициализация чертежа прошла успешно, и пользователь заполнил все необходимые метаданные горных пород ПО переходит в состояние «Ожидания выбора метода расчета», в котором у пользователя появляется возможность выбора необходимого метода расчета устойчивости.

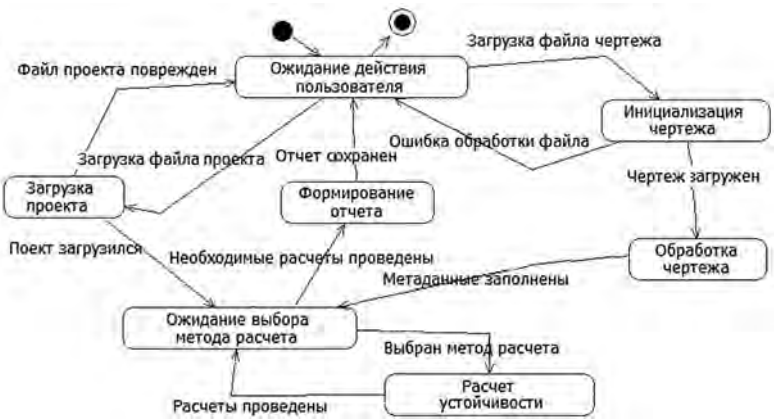

Рис. 8. Диаграмма «Statechart»

• Если необходимые расчеты были проведены у пользователя открывается доступ к функции вывода отчета о проведенной работе и ПО переходит в состояние «Формирование отчета», результатом которого будет сформированный файл отчета на диске.

• Так же у пользователя доступна возможность после запуска ПО загрузить ранее сохраненный проект, и после проверки проекта на целостность, ПО перейдет в состояние «Ожидания метода расчета».

• Состояние «Ожидание метода расчета» составляет замкнутый контур с состоянием «Расчета устойчивости», что обусловлено набором методов расчета устойчивости предоставленных пользователю на выбор.

Далее рассматривается схема развертывания ПО посредствам диаграммы «Deployment».

На диаграмме «Deployment», представленной на рис. 9, появилась возможность представления всех необходимых компонентов развертывания ПО на предприятии. Данная диаграмма обладает некоторыми особенностями:

• Базы метаданных горных пород и графического обозначения горных пород расположены на сервере с учетом их объема, чувствительности к транспортировке и возможности доступа с любого места локальной сети предприятия.

• Загрузка в ПО чертежа откосного сооружения может производиться не только с локального компьютера, а также по средствам передачи с USB накопителя.

Далее, построим диаграмму классов проектируемого ПО.

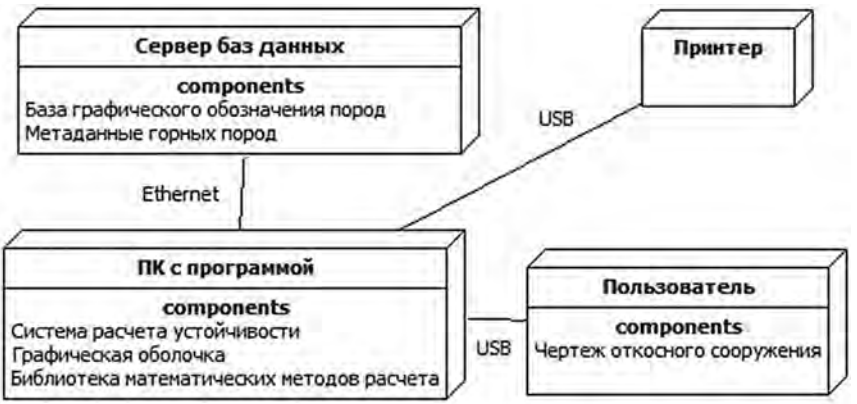

Рис. 9. Диаграмма развертывания ПО (Deployment)

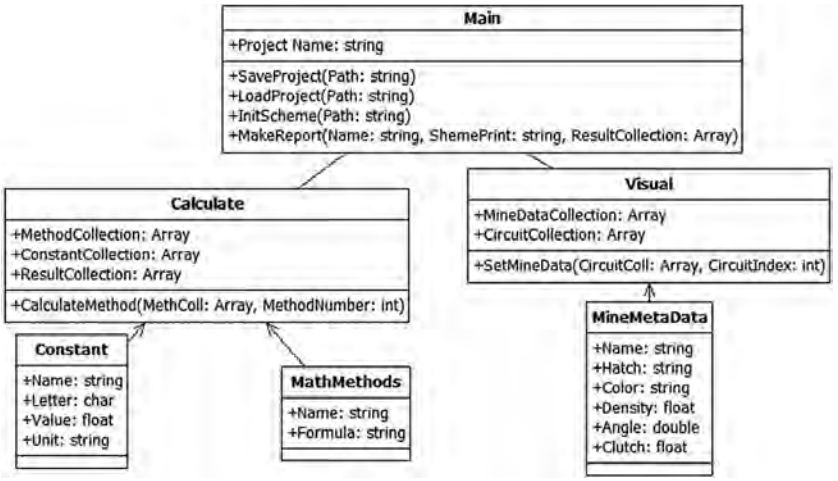

Рис. 10. Диаграмма классов

На рис. 10 представлена архитектура классов ПО, включающая:

• Класс Main – класс, отвечающий за сохранение и загрузку проекта, формирование и сохранение отчета, и за инициализацию чертежа.

• Класс Calculate – в данном классе сконцентрирован весь математический функционал ПО. Атрибутами данного класса являются: MethodCollection – коллекция доступных методов для расчета, загруженная из базы данных, ConstantCollection – коллекция констант, используемых при математических расчетах, ResultCollection – коллекция, отвечающая за хранение результатов проведенных ранее расчетов.

• Класс Visual – класс, отвечающий за графическое представление чертежа и визуализацию горных пород.

Результат

На основе спроектированных решений был разработан прототип ПО (рис. 11, 12). На рис. 11 показана рабочая область программы с которой взаимодействует пользователь. Она представляется 3-мя основными областями:

• Чертеж и визуализация горных пород – данная область представляется графическим отображением конструкции откоса, а также нанесенным на него [чертеж] горными породами с индивидуальной штриховкой и визуализацией в цветовой шкале;

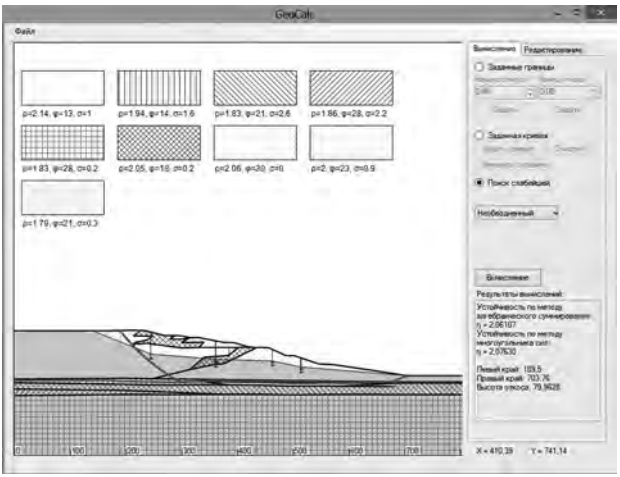

Рис. 11. Рабочая область ПО

• Вкладка «Вычисления» отвечающая за выбор метода расчета устойчивости, настройку начальных условий и управление дополнительных построений;

• Вкладка «Редактирование» – содержащая в себе весь функционал, связанный с визуализацией горных пород, инструменты для нанесения пород на чертеж, а также присвоения метаданных горным породам;

Вкладка «Файл» организует процессы, связанные с загрузкой/сохранением чертежа и проекта, а также функцию «Выход» для завершения работы с программы.

На рис. 12 представлен сформированный отчет о проведенной работе в формате PNG. Важнейшими компонентами отчета являются:

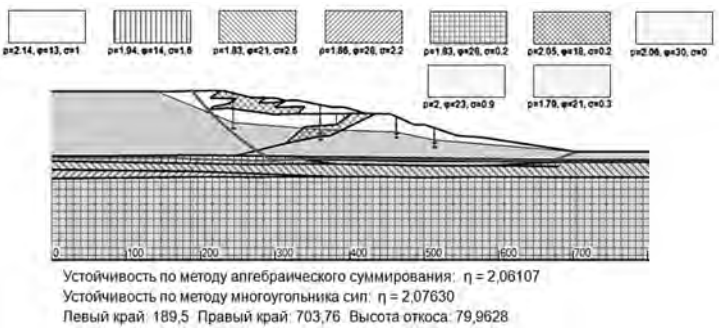

Рис. 12. Сформированный отчет о проведенной работе в формате PNG

• Графическое представление конструкции откосного сооружения с нанесенными на него дополнительными построениями и визуализацией горных пород;

• Таблица используемых горных пород, их визуализация и метаданные;

• Результаты методов расчета устойчивости;

• Перечень метаданных конструкции откосного сооружения и начальные условия расчетов.

• Отчет также может быть сформирован в формат DOCX. Выбор формата представляется пользователю в момент сохранения отчета на диск.

Заключение

В рамках данной статьи была исследована актуальность разработки программного обеспечения расчета устойчивости откосных сооружений, проанализированы существующие бизнес-процессы и выявлены процессы подлежащие автоматизации, также были выработаны требования к разрабатываемому ПО, и на их основе создан рабочий прототип.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Трость В. М.*, *Зуй В. Н.*, *Пуневский С. А.* Инструкция пользователя программного обеспечения к расчетам устойчивости карьерных откосов. – М.: Изд-во МГГУ, 2009.

2. *Гальперин А. М.* Геомеханика открытых горных работ. – М.: Изд-во МГГУ, 2003.

3. *Мельников И. Т. Заляднов В. Ю.*, *Шевцов Н. С.* Автоматизированный расчет устойчивости откосов бортов карьеров. – М.: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2013.

4. Перспективы [Электр. ресурс] // Статья из Фонда исторической перспективы – Центр исследований и аналитики – режим доступа http://www.perspektivy.info/rus/ekob/globalnajagornodobyvajushhajaprom yshlennost2012–10-11.htm, дата обращения: 5.05.2016.

5. UML [Электр. ресурс] // Статья из Википедии – Свободной энциклопедии – режим доступа https://ru.wikipedia.org/wiki/UML, дата обращения: 1.04.2016.

6. ООО «ИнжПроектСтрой». Расчет устойчивости склонов и откосов. Руководство пользователя. – М.: ИнжПроектСтрой, 2015. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Бас Никита Сергеевич[1] – студент,
e-mail: needyzavrrr@gmail.com,
Костин Виталий Николаевич[1] – кандидат технических наук,
доцент, e-mail: iitem1@yandex.ru,
НИТУ «МИСиС».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 11, pp. 33–46.

UDC 624.131

N.S. Bas, V.N. Kostin

DESIGN OF SOFTWARE FOR CALCULATION OF STABILITY OF SLOPING STRUCTURES

In this article considers the problem of calculating the stability of sloping structures. The results of these calculations required for the design of measures to prevent landslides and further work in this area. Most accurate results require the data set is not associated sensors. Their classification and treatment is the main purpose of this software.

This project analyses the business processes of the subject area by means of the IDEF0 methodology (models of the existing organization of the process AS-is and future TO-BE, after the implementation). Also generated requirements to software development, by means of diagrams modeling language (UML).

In this article, also, examines the methods of calculation of stability of sloping structures: methods of summation for troglocimmerites monotonic and curvilinear surfaces and methods of polygon of forces.

Based on the analysis developed requirements, developed a working prototype software the calculation of the stability of sloping structures.

Key words: calculation of the stability of sloping structures, rocks, mining, summing across troglocimmerites monotonic and curvilinear surfaces, the method of polygon of forces.

AUTHORS

Bas N.S.[1], Student, e-mail: needyzavrrr@gmail.com,
Kostin V.N.[1], Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: iitem1@yandex.ru,
[1] National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Trost' V. M., Zuy V. N., Punevskiy S. A. *Instruktsiya pol'zovatelya programmnogo obespecheniya k raschetam ustoychivosti kar'ernykh otkosov* (User's manual on slope stability design software), Moscow, Izd-vo MGGU, 2009.

2. Gal'perin A. M. *Geomekhanika otkrytykh gornykh rabot* (Geomechanics of open pit mining), Moscow, Izd-vo MGGU, 2003.

3. Mel'nikov I. T. Zalyadnov V. Yu., Shevtsov N. S. *Avtomatizirovannyy raschet ustoychivosti otkosov bortov kar'erov* (Automated slope stability design for open pit mines), Moscow, Izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2013.

4. *Perspektivy. Stat'ya iz Fonda istoricheskoy perspektivy Tsentr issledovaniy i analitiki*. available at: http://www.perspektivy.info/rus/ekob/globalnajagornodobyvajushhajapromyshlennost2012–10-11.htm (accessed: 5.05.2016).

5. *UML. Stat'ya iz Vikipedii Svobodnoy entsiklopedii*, available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/UML (accessed: 1.04.2016).

6. *OOO «InzhProektStroy». Raschet ustoychivosti sklonov i otkosov. Rukovodstvo pol'zovatelya* (InzhProektStroi Ltd. Slope stability design. User's manual), Moscow, InzhProektStroy, 2015.