

УДК 624.131.1

DOI 10.52928/2070-1683-2025-40-1-23-28

ВЫБОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ВЫСОКИХ НАСЫПЕЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

канд. техн. наук А.Н. НЕВЕЙКОВ¹⁾, канд. техн. наук В.В. ТАЛЕЦКИЙ²⁾,
В.Н. ДЕДОК³⁾, А.В. ЛУКАСЕВИЧ⁴⁾

^(1), 2), 4) Белорусский государственный университет транспорта, Гомель,

³⁾ Брестский государственный технический университет)

¹⁾ geomonolith@gmail.com

В статье приведен обзор программного обеспечения для расчета устойчивости откосов в условиях плоского напряженного состояния и результаты их опробования для решения представленной тестовой задачи. В качестве примера была принята высокая насыпь земляного полотна железной дороги из однородного грунта. Для расчетов применяли программное обеспечение, основанное как на аналитических (метод предельного равновесия), так и на численных (метод снижения прочности) методах расчета.

Ключевые слова: насыпь, устойчивость откоса, поверхность скольжения, коэффициент устойчивости, методы расчета устойчивости, метод предельного равновесия, метод Шахунянца, метод снижения прочности.

Введение. Проблема оценки устойчивости откосов является весьма актуальной. Необходимость решения задач об устойчивости откосов высоких насыпей земляного полотна железных и автомобильных дорог, армированных геосинтетическими материалами и нагельно-свайными конструкциями, поставила вопрос о выборе программного обеспечения для выполнения их расчетов. Для этого рассмотрены программы, имеющиеся в проектных организациях, где студенты и магистранты проходят практику, а также программы, находящиеся в свободном, триальном или демонстрационном доступе, ограничения которых обеспечат их опробование при решении представленной ниже тестовой задачи в плоской постановке с учетом введения в последующем удерживающих и армирующих материалов и конструкций. Это не исключает применения проектировщиками других программ для решения подобных задач.

Общие сведения о методах расчета устойчивости откосов и определении их коэффициента устойчивости. В настоящее время имеется большое разнообразие программ, применимых для расчета устойчивости откосов и склонов и разработанных для упрощения решения таких задач. Среди программ существуют как узкоспециализированные программы, основанные на аналитических методах расчета, так и универсальные, которые основаны на численных методах, предназначенных для решения широкого спектра задач, в том числе и геотехнических. Такое разделение зависит от применяемых методов расчета, которые удовлетворяют условию предельного или статического равновесия – по круглоцилиндрическим и произвольным поверхностям скольжения (аналитические) или снижения прочностных характеристик грунтов (численные).

Оценка степени устойчивости откоса в программах определяется вычислением коэффициента устойчивости ($K_{уст}$), который сравнивается с нормативным его значением ($K_{ст}$), установленным действующими ТНПА. Коэффициент устойчивости в аналитических методах расчета определяется как отношение сил (моментов), удерживающих массив грунта на наклонной поверхности, к силам (моментам), сдвигающим этот массив, а в численных методах расчета – как отношение прочностных характеристик грунта, заданных в программе, к их рассчитываемым программой предельным значениям, при которых происходит разрушение оснований и откосов.

Описание основных методов расчета, применяемых в программах, приведено во многих публикациях, которые посвящены проблеме устойчивости откосов, технических руководствах к программам и подробно нами не рассматривается. При этом отметим, что среди аналитических методов расчета в большинстве зарубежных программ отсутствуют отечественные методы, а численные в сравнении с аналитическими методами имеют ряд преимуществ, позволяя выполнять более точные расчеты для сложных инженерно-геологических условий, в том числе и при армировании геосинтетическими материалами и нагельно-свайными конструкциями. Применение методов предельного равновесия целесообразно для несложных задач, предварительного вариантного проектирования и окончательной проверки принятого проектного решения. Данные методы имеют ряд упрощений и допущений, но при этом обеспечивают получение достаточно достоверных и точных для практики результатов при решении задач в простых и средней степени сложности инженерно-геологических условиях.

Все аналитические методы теории предельного равновесия учитывают ряд допущений [1]:

- используется гипотеза затвердевшего тела;
- рассматривается узкий участок склона шириной 1 метр, а условия его работы принимаются для всего склона без учета его пространственной работы;
- принимается определенная форма поверхности скольжения;
- принимаются допущения о гидродинамических и сейсмических воздействиях;
- принимается определенный учет сил взаимодействия между отсеками, на которые разбивается оползневый блок.

При расчетах методами предельного равновесия задаются начальной поверхностью скольжения, после чего путем последовательных приближений с использованием характерных точек определяется положение критической поверхности скольжения с минимальным значением коэффициента устойчивости.

Среди большого разнообразия методов расчета устойчивости выделяют всего четыре способа или класса, отличающиеся своей оригинальной системой сил, действующих на отсеки (Крея, Свена – Гультена, Терцаги, Феллениуса). Другие известные способы, например, Бишопа, Маслова, Шахунянца, касаются главным образом только механизма расчетов или учета тех или иных дополнительных усложняющих элементов. Методы расчета делятся по механизму расчета на удовлетворяющие общему равновесию моментов, равновесию сил, равновесию моментов и сил, а по учету сил взаимодействия между отсеками – на учитывающие только основные силы, учитывающие горизонтальные (касательные) силы взаимодействия отсеков, учитывающие вертикальные (нормальные) силы взаимодействия отсеков, учитывающие вертикальные (нормальные) и горизонтальные (касательные) силы [2].

Таким образом, по полноте учета факторов (таблица 1) методы Моргенштейна – Прайса и Спенсера являются наиболее достоверными, и рассчитанный по ним коэффициент устойчивости следует в общем случае проектирования, если иное не оговорено нормами проектирования, сравнивать с нормативным его значением ($K_{уст} \geq K_{st} = 1,1 \dots 1,4$). Методы Феллениуса, Шахунянца, Янбу являются консервативными, так как занижают устойчивость и могут применяться для проверки устойчивости относительно состояния предельного равновесия ($K_{уст} \geq 1$) [2].

Важно также отметить, что каждый из этих методов имеет свою область применения. Среди методов расчета есть те, которые нашли широкое применение в конкретных отраслях строительства. Например, метод Шахунянца является основным при проектировании откосов земляного полотна железных дорог¹.

Таблица 1. – Факторы, учитываемые в основных аналитических методах расчета²

Метод расчета	Общее уравнение моментов ($\Sigma M_i = 0$)	Общее уравнение сил ($\Sigma F_i = 0$)	Нормальные (вертикальные) силы взаимодействия между отсеками	Касательные (горизонтальные) силы взаимодействия между отсеками
Горизонтальных сил	–	+	–	–
Касательных сил	–	+	–	–
Феллениуса	+	–	–	–
Шахунянца	–	+	+	–
Бишопа	+	–	+	–
Янбу	–	+	+	–
Моргенштейна – Прайса	+	+	+	+
Спенсера	+	+	+	+

Примечание. «+» – учитываются в методе; «–» – не учитываются в методе.

Большинство аналитических методов расчета устойчивости основывается на положениях теории предельного равновесия, при рассмотрении грунтового массива с точки зрения критерия прочности Кулона – Мора, согласно которому разрушение грунта происходит в виде сдвига по поверхности с наименьшей несущей способностью, определяемой его прочностными характеристиками: сцеплением и углом внутреннего трения. Решение такого рода задач обеспечивается связью между нормальными и касательными напряжениями. Несколько другой алгоритм расчета использован при выполнении расчетов численными методами. Если аналитические методы подразумевают предварительное нахождение потенциальных поверхностей скольжения, а затем выполнение по ним расчета устойчивости с определением наименее устойчивой конфигурации склона, то в численных методах этот недостаток отсутствует, так как применяется метод снижения прочности (*SRM – shear reduction method*).

Суть данного метода заключается в одновременном снижении показателей прочностных характеристик – угла внутреннего трения (φ) и удельного сцепления грунта (c_1). При этом возникающие в массиве деформации оцениваются для каждой итерации, вплоть до наступления момента разрушения грунта. Положение поверхности скольжения формируется автоматически исходя из величины возникающих в массиве деформаций. Таким образом, программой одновременно выполняются расчет коэффициента устойчивости склона и нахождение наиболее опасной поверхности скольжения. При расчете методом снижения прочности нет необходимости учитывать предпосылки или упрощения относительно аналитических методов.

¹ ТКП 45-3.03-163-2009. Железные дороги. Земляное полотно. Правила проектирования. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2010. – 99 с.

² Руководство пользователя к программе «*GEO-stab*. Расчет устойчивости склонов и откосов». URL: <https://malininsoft.ru/GeoStab-UserGuide>.

Следует отметить, что разработчики аналитических методов расчета устойчивости не предполагали применения в своих методах специальных удерживающих конструкций для укрепления склонов и откосов, учет которых введен в методы разработчиками программного обеспечения, поэтому, основываясь на отмеченных недостатках аналитических методов, численным расчетам следует отдавать предпочтение.

Обзор программного обеспечения и анализ сложности его применения. Наличие многочисленных программ и имеющихся в них методов расчета ставит вопрос об их применимости для решения поставленных задач.

Для успешного решения поставленных задач программа должна предоставлять пользователю развитый набор функций по подготовке исходных данных, обработке результатов расчета и их документированию, а также соответствовать современным алгоритмам расчета.

В зависимости от степени соответствия данным критериям, легкости и универсальности применения все программы по своей мощности и эффективности условно можно разделить на три группы:

1) простые – *SLIDE*-Балтпроект-4.0, *ОТКОС*-5.01, *ЭСПРИ*-устойчивость склона, *SCAD*-откос, *SLOPE-stability*, *ДКУ*-4.0 и др.;

2) средние – *STAB*-3.3, *GEO-stab*, *ГЕО5*-устойчивость откоса, *GenID32*, *GEOSTUDIO-slope/w*, *ROCSCINE-slide*, *HIRCAN* и др.;

3) сложные (в перечень включены только геотехнические программы) – *ADONIS*, *ГЕО5*-МКЭ, *FLAC*, *ROCSCINE-RS*, *PLAXIS*, *MIDAS*, *Z-SOIL*, *SiO-2d* и др.

Программы первой группы просты в освоении, но требуют координатного ввода очертаний откоса, границ грунта и уровня грунтовых вод, имеют ограниченное количество аналитических методов расчета и вводимых слоев грунта, требуют задания простого очертания слоев грунта, не поддерживают экспорт/импорт расчетных схем из графических программ, не позволяют формировать подробные отчеты о введенных данных и результатах расчета, не допускают применения специальных удерживающих конструкций для укрепления склонов и откосов.

Программы средней сложности достаточно просты в освоении. Большинство программ имеют удобный интерфейс с интерактивным вводом очертаний откоса, границ грунта, удерживающих конструкций, нагрузок и других данных, поддерживают экспорт/импорт расчетных схем из графических программ, используют большое количество аналитических методов расчета, позволяют выполнять стадийные расчеты и формировать подробные отчеты о введенных данных и результатах расчета. Во многих программах можно легко создавать и анализировать сложные модели для учета неоднородности сложения грунтового массива – выклинивающиеся слои, замкнутые линзы, удерживающие конструкции для укрепления склонов и откосов, подземные и грунтовые воды, наличие водоупорных слоев, влияние поверхностных и сейсмических нагрузок.

Программы третьей группы трудны в освоении, реализованы на численных методах расчета и предназначены для решения широкого спектра геотехнических задач со сложными расчетными схемами. Программы данной группы имеют разнообразные модели нелинейной работы грунта под нагрузкой и возможность моделирования различных конструкций, в том числе и удерживающих для укрепления склонов и откосов, допускают интерактивный ввод многих данных, поддерживают экспорт/импорт расчетных схем из графических программ, позволяют формировать отчеты о введенных данных и результатах расчета. Несмотря на то, что данные программы включают только один метод расчета (снижения прочностных характеристик грунта) для всех моделей грунта, он является альтернативным всем методам предельного равновесия. При расчете устойчивости данным методом программы уменьшают заданные расчетные значения угла внутреннего трения и удельного сцепления грунта и отслеживают момент, когда произойдут нарастание пластических деформаций в откосе и потеря его устойчивости. В результате расчета получаем коэффициент устойчивости откоса, который соответствует решениям с применением классических методов.

Программы, основанные на численных методах, как правило, выдают более точные результаты расчетов и имеют гибкие возможности моделирования, но при этом более сложны для самостоятельного освоения без прохождения специализированного обучения, требуют больше времени для выполнения расчетов, а также наличия опыта выполнения схожих расчетов.

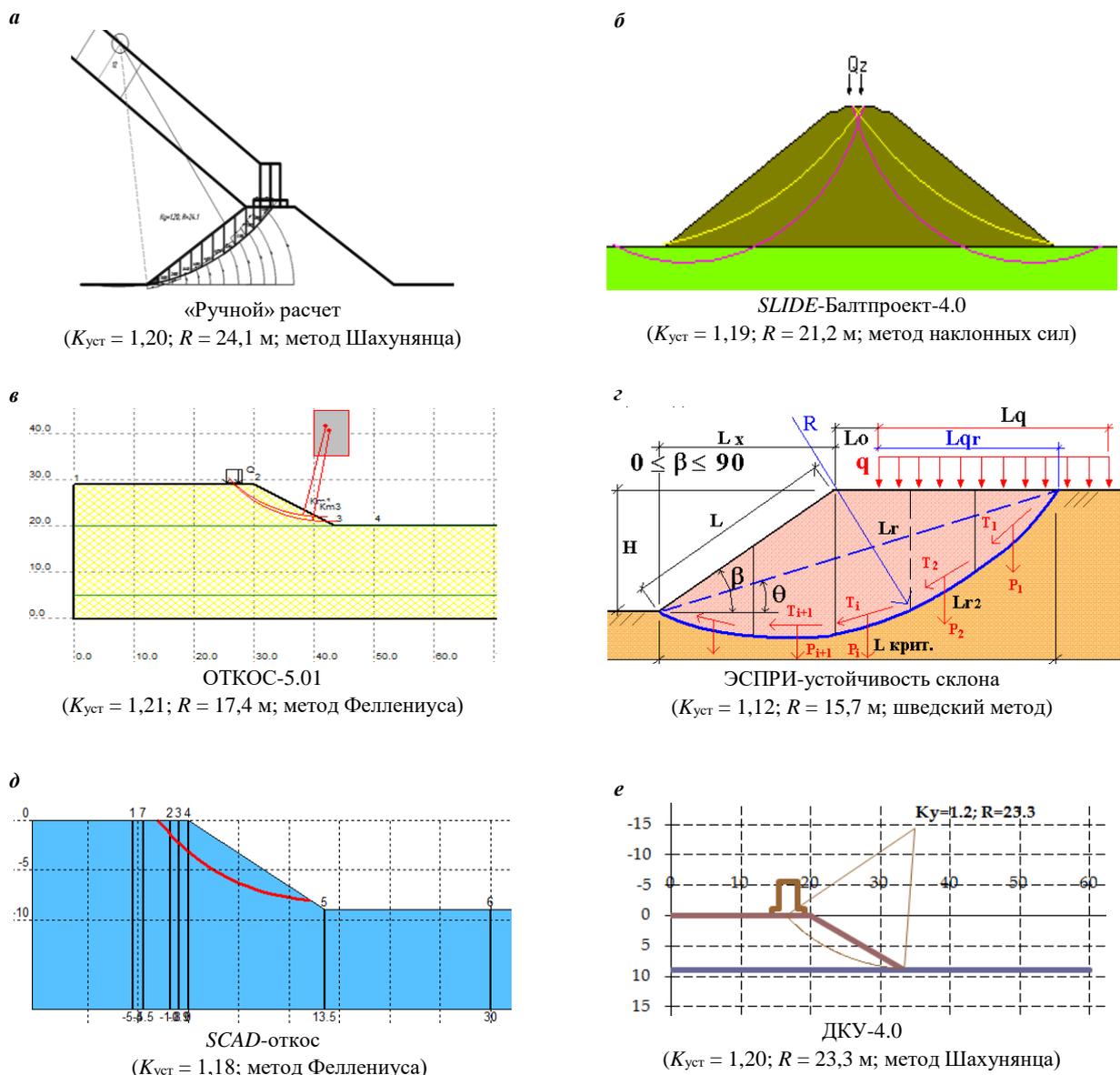
Тестовая задача, результаты ее расчета и их анализ. В качестве тестовой задачи при выборе программного обеспечения принята насыпь из дренирующих грунтов под однопутную железную дорогу высотой 9 м с крутизной откосов 1:1,5 и шириной основной площадки 6,6 м. Насыпь сложена из песка крупного с характеристиками $\gamma_1 = 18,1 \text{ кН/м}^3$; $\varphi_1 = 36^\circ$; $c_1 = 1 \text{ кПа}$; $E = 38 \text{ МПа}$. Основанием насыпи служит песок мелкий с характеристиками $\gamma_1 = 18,5 \text{ кН/м}^3$; $\varphi_1 = 32^\circ$; $c_1 = 2 \text{ кПа}$; $E = 28 \text{ МПа}$ и уровнем грунтовых вод на 2 м ниже подошвы насыпи. В большинстве программ для упрощения рассматривали решение для одностороннего откоса.

В тестовой задаче согласно ТКП 45-3.03-163-2009³ расчетная нагрузка от подвижного состава принята эквивалентной равномерно распределенной на ширине 2,7 м величиной 90 кПа, а расчетная постоянная нагрузка от веса рельс, шпал и балластного слоя принята равномерно распределенной на ширине 4,6 м величиной 20 кПа.

³ См. сноску 1.

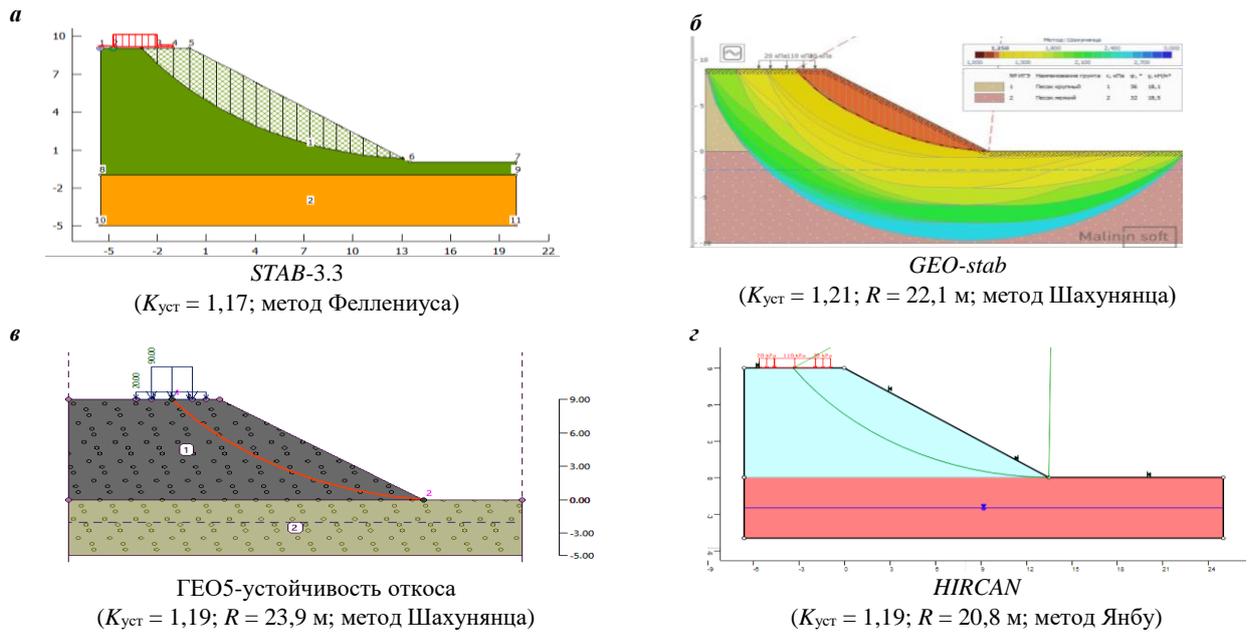
Тестовую задачу расчета устойчивости откосов решали «вручную» по методу Шахунянца, который определен требованиями ТНПА, как и в программах первой и второй групп, а при его отсутствии в программах – по методу Феллениуса или Ямбу. Эти методы являются наиболее консервативными, а соответственно, и надежными, так как по данным методам получены минимальные и близкие к методу Шахунянца коэффициенты устойчивости. В третьей группе программ при решении тестовой задачи для грунтов принята модель Кулона – Мора, а расчет выполнен методом снижения прочностных характеристик грунтов. Следует отметить, что в таком случае результаты численного решения по принятой модели Кулона – Мора для грунтов можно будет достаточно корректно сравнивать с результатами аналитических решений. Это объясняется тем, что параметры грунта и условие предельного состояния являются идентичными, а все параметры грунта данной модели содержатся в отчетах об инженерно-геологических изысканиях (удельный вес грунта – γ_1 , кН/м³; удельное сцепление – c_1 , кПа; угол внутреннего трения – ϕ_1 , градусов; модуль деформации – E , МПа).

Далее на рисунках 1–3 (рисунки даны по номерам групп программ) приведены результаты расчета не менее чем по четырем программам в каждой группе. В результатах приведены: форма поверхности скольжения, значение коэффициента устойчивости, радиус поверхности скольжения, если его значение определяется в программе.



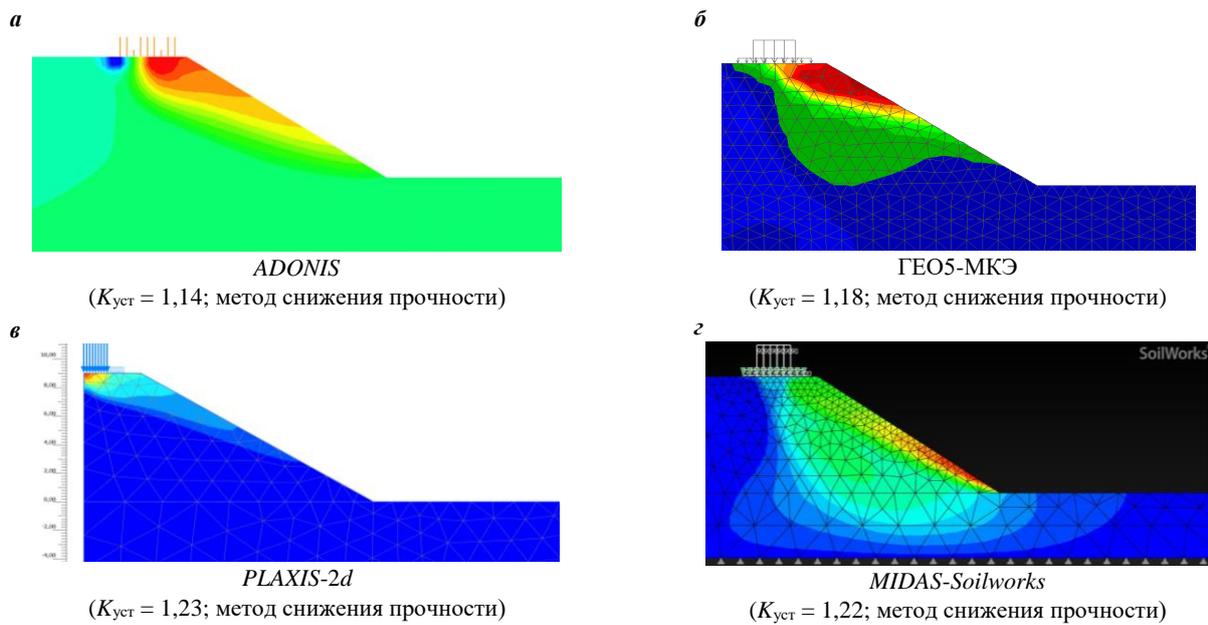
a – «вручного» расчета; **б** – *SLIDE*-Балтпроект-4.0; **в** – *ОТКОС*-5.01; **г** – *ЭСПРИ*-устойчивость склона; **д** – *SCAD*-откос; **е** – *ДКУ*-4.0

Рисунок 1. – Результаты «вручного» расчета и в программах 1-й группы



а – STAB-3.3; б – GEO-stab; в – ГЕО5-устойчивость откоса; г – HIRCAN

Рисунок 2. – Результаты расчета в программах 2-й группы



а – ADONIS; б – ГЕО5-МКЭ; в – PLAXIS-2d; г – MIDAS-Soilworks

Рисунок 3. – Результаты расчета в программах 3-й группы

Опытное опробование рассмотренных программ на тестовой задаче позволило сделать некоторые выводы о возможности их применения для дальнейшего решения поставленных задач. В большинстве рассмотренных расчетных программ при принятых одинаковых исходных данных для тестовой задачи получены схожие с небольшим отличием от «ручного» расчета по методу Шахунянца значения коэффициента устойчивости откоса ($K_{уст} = 1,17 \dots 1,23$) и положения критической поверхности скольжения, а в программах «ADONIS» и «ЭСПРИ-устойчивость склона» – несколько заниженные значения ($K_{уст} = 1,14$ и $K_{уст} = 1,12$ соответственно). Различия в значениях коэффициента устойчивости откоса объясняются применяемыми методами расчета и точностью настроек детализации в них при автоматизации поиска предельных значений во время выполнения расчета. Для наглядности результаты расчетов устойчивости откоса тестовой задачи в опробованных программах сведены в таблицу 2.

Таблица 2. – Результаты расчетов устойчивости откоса тестовой задачи

Показатель в программе	Наименование программы													
	Ручной расчет	SLIDE-Баллпроект-4.0	ОТКОС-5.01	ЭСРИ-устойчивость склона	SCAD-откос	ДКУ-4.0	STAB-3.3	GEO-stab	ГЕО5-устойчивость откоса	HIRCAN	ADONI	ГЕО5-МКЭ	PLAXIS-2d	MIDAS-Soilworks*
Метод расчета (обозначение)	Ш	НС	Ф	ШМ	Ф	Ш	Ф	Ш	Ш	Я	СП	СП	СП	СП (Ф, Я)
Коэффициент устойчивости ($K_{уст}$)	1,20	1,19	1,21	1,12	1,18	1,2	1,17	1,21	1,19	1,19	1,14	1,18	1,23	1,22 (1,19)
Радиус поверхности скольжения ($R, м$)	24,1	21,2	17,4	15,7	-	23,3	-	22,1	23,9	20,8	-	-	-	- (22,2)

Примечание. Расшифровка обозначений в таблице:

«Ф» – Феллениуса; «Ш» – Шахунянца; «Я» – Ямбу; «НС» – наклонных сил; «СП» – снижения прочности; «ШМ» – шведский метод;

«*» – программа допускает расчет методами предельного равновесия (результат не представлен на рисунке 2) и конечных элементов.

Заключение. На основании выполненного обзора имеющихся программ и опытного их опробования на тестовой задаче приняли, что для дальнейших расчетов устойчивости откосов высоких насыпей земляного полотна железных дорог наиболее приемлемыми являются программы «ГЕО5-устойчивость откоса» (альтернатива «GEO-stab») из-за возможности ввода специальных удерживающих и армирующих конструкций, простоты освоения, удобного интерфейса, возможности выполнения расчетов по методу Шахунянца, наличия подробного отчета по выполненным расчетам, а также «ГЕО5-МКЭ» (альтернатива «PLAXIS-2d») как программа для решения широкого спектра геотехнических задач.

Возможностей программ, входящих в единый расчетный комплекс «ГЕО5», достаточно для решения поставленных задач, так как применяемые в них алгоритмы уже прошли апробацию на практике [3] и имеют развитые технические руководства⁴.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневое давление / Разраб. Л.К. Гинзбург. – М.: ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1986. – 123 с.
2. Федоренко Е.В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 6 (49). – С. 24–26.
3. Геотехника и геосинтетика в вопросах и ответах: справочное пособие / Под ред. Е.В. Федоренко. – СПб., 2016. – 198 с.

REFERENCES

1. Ginzburg, L.K. (1986). *Rekomendatsii po vyboru metodov rascheta koeffitsienta ustoichivosti sklona i opolznevogo davleniya*. Moscow: TsBNTI Minmontazhspestraya SSSR. (In Russ.).
2. Fedorenko, E.V. (2013). Metod rascheta ustoichivosti putem snizheniya prochnostnykh kharakteristik. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 6(49), 24–26. (In Russ.).
3. Fedorenko, E.V. (Eds.) (2016). *Geotekhnika i geosintetika v voprosakh i otvetakh: spravochnoe posobie*. Saint Petersburg. (In Russ.).

Поступила 04.02.2025

THE CALCULATION SOFTWARE SELECTION FOR THE RAILWAY ROADBEDS HIGH MOUNDS SLOPE STABILITY

A. NEVEIKOV¹⁾, V. TALETSKI²⁾, V. DEDOK³⁾, A. LUKASEVICH⁴⁾
^(1), 2), 4) Belarusian State University of Transport, Gomel,
³⁾ Brest State Technical University)

The paper is devoted to the slope stability calculating software overview and calculation testing results comparison in the flat formulation. A railway high embankment of homogeneous soil was taken for the example calculations. Software based on both analytical (limit equilibrium method) and numerical methods (shear reduction method) was used for the calculations.

Keywords: embankment, slope stability, sliding surface, stability coefficient, stability calculation methods, limit equilibrium method, Shakhunyan's method, shear reduction method.

⁴ Технические руководства к программам «ГЕО5». URL: <https://www.finesoftware.ru/geotekhnicheskikh-raschetov/teoreticheskie-rukovodstva/>.