

**ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРНЫХ МАССИВОВ НА ОБЪЕКТАХ
КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ**

Попов Антон Олегович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструктивно-дизайнерское проектирование»

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
e-mail: l.sabitov@bk.ru*

Сабитов Линар Салихзанович

доктор технических наук, профессор кафедры «Конструктивно-дизайнерское проектирование»

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
e-mail: l.sabitov@bk.ru*

Поляков Леонид Григорьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «НГиГ»

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

e-mail: l.sabitov@bk.ru

Стешин Кирилл Михалович

студент группы 20ИСТ1

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

e-mail: l.sabitov@bk.ru

**DIGITAL MODELING OF MOUNTAIN MASSIFS AT CULTURAL HERITAGE
SITES**

Popov Anton Olegovich

candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department. "Structural and design engineering"

*Kazan (Volga region) Federal University,
e-mail: l.sabitov@bk.ru*

Sabitov Linar Salikhzanovich

doctor of technical sciences, professor "Constructive and design design"

*Kazan (Volga Region) Federal University,
e-mail: l.sabitov@bk.ru*

Polyakov Leonid Grigorievich

candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "NGiG"

*FGBOU VO «Penza state University of architecture and construction»
e-mail: l.sabitov@bk.ru*

Steshin Kirill Mikhailovich

student of group 20IST1

*FGBOU VO «Penza state University of architecture and construction»
e-mail: l.sabitov@bk.ru*

Аннотация: Дается анализ использования расчетной программы PLAXIS для моделирования горных массивов на объекте культурного наследия «Лестницы Большие и

Малые» середина XIX века, конец XIX века (Республика Крым, г. Керчь, ул. Театральная, ул. 23 Мая 1919 года».

Ключевые слова: *объект культурного наследия, цифровое моделирование, PLAXIS, техническая экспертиза, строительные конструкции.*

Abstract: *An analysis is given of the use of the PLAXIS calculation program for modeling mountain ranges at the cultural heritage site “Big and Small Staircases”, mid-19th century, end of the 19th century (Republic of Crimea, Kerch, Teatralnaya St., 23 May 1919 St.).*

Key words: *cultural heritage site, digital modeling, PLAXIS, technical expertise, building structures.*

В геоморфологическом отношении Большая Митридатская и Малая Митридатская лестницы расположены в восточной части Керченской холмисто-грядовой равнины на северо-восточном склоне горы Митридат. Склон террасирован; на террасах расположено несколько улиц с жилыми застройками (Верхнемитридатская ул., ул. Рыбакова, 1-й Митридатский пер., ул. 23 Мая 1919 года, ул. 51-й Армии). Большая Митридатская лестница берет свое начало от ул. 51-й Армии с высотной отметкой 12,40 м. и заканчивается на вершине горы Митридат с высотной отметкой 80,56 м. Малая Митридатская лестница расположена между ул. 23 мая 1919 года (высотная отметка 22,02 м.) и ул. Театральная (высотная отметка 7,48 м.) [1,2].

В географическом отношении участок проектирования расположен на Керченском полуострове в городе Керчь. Протяженность исследуемой территории - от подножия до вершины горы Митридат.

Гидрогеологические условия верхней гидрогеологической зоны в пределах проектируемых объектов характеризуются развитием водоносного горизонта четвертичных отложений, который приурочен к делювиальным отложениям. Водовмещающими породами являются суглинки, пески различной крупности и их прослойки в глинистых разностях. Питание осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков. Режим фильтрации - безнапорный.

По результатам определения степени агрессивного воздействия жидких неорганических сред на бетон, выявлено, что подземные воды неагрессивные (за исключением единственного случая, в котором воды слабоагрессивны по отношению к бетону марки типа W4).

Город Керчь расположен на востоке Керченского полуострова. Рельеф местности крупно и мелкохолмистый, множество балок и оврагов. Холмы высотой от 40 до 90 м (гора Митридат – 91,4 м).

Климат района степной, умеренно-жаркий, с мягкой неустойчивой зимой, со значительными колебаниями температур, обуславливающими отсутствие устойчивого снежного покрова.

Средняя относительная влажность воздуха составляет 74%. Среднемесячная относительная влажность воздуха в теплый период составляет 63-76%; в холодный период 78-83%.

Средняя годовая температура воздуха составляет +12,0°C. Максимальная среднемесячная температура приурочена к июлю-августу (от +26°C до +30°C); минимальная к январю-февралю – 19 – 22°C. В летние периоды абсолютный максимум достигает +41°C. Средняя продолжительность безморозного периода составляет 221 день. Продолжительность периода со среднесуточной температурой менее 8°C составляет 142 дня в году; менее 10°C – 163 дня. Нормативная глубина промерзания грунтов составляет 0,8 м.

Господствующим направлением ветров в течении года является западное. Его повторяемость составляет 19-32% ежемесячно. Средняя годовая скорость ветра составляет 5 м/сек. Максимальная скорость ветра – 36 м/сек [3,4].

В соответствии с картами сейсмического районирования ОСР-2015, согласно СП 14.13330.2014, фоновая сейсмическая интенсивность в баллах шкалы MSK-64 для средних грунтовых условий и трех степеней сейсмической опасности – А(10%), В(5%), С(1%) в течении 50 лет составляет соответственно 8, 9, 9 баллов. А также, исходя из результатов проведенного сейсмического микрорайонирования, отмечено следующее: проведенные полевые геолого-геофизические исследования, математические и аналитические расчеты для сейсмического микрорайонирования площадки строительства объекта «Лестницы большие и Малые» середина XIX века, конец XIX века (Республика Крым, г. Керчь, ул. Театральная, ул. 23 Мая 1919 года), расположенного по адресу: Республика Крым, г. Керчь, ул. Театральная, ул. 23 мая 1919 года», позволяют утверждать, что сейсмичность на части обследованной территории не превышает 8 баллов по шкале VSK-64. На основании инженерно-геологических исследований 170816-ПР-ИГЛ выяснено, что инженерно-геологические условия площадки, согласно СП 47.13330.2016, соответствуют III категории сложности.

Абсолютные отметки поверхности рельефа в пределах исследуемой территории изменяются от 6 м до 81 м.

При проектировании и производстве последующих работ рекомендуется:

- остановить активные и предотвратить возможное возникновение и дальнейшее развитие опасных геологических процессов (эрозионные процессы, осыпные процессы, оползневые процессы) путем укрепления склонов, закрепления неустойчивых слоев грунта и организации поверхностного стока.

- учитывать особенности проектирования зданий и сооружений на насыпных и набухающих грунтах, на оползнеопасных и сейсмоопасных территориях.

- в качестве оснований и несущего слоя рекомендуется использовать грунты ИГЭ-3.

Керченский полуостров имеет особое геологическое строение - это и не платформа, и нетипичное складчатое сооружение; это делает его непохожим на соседние равнины и горы Крыма. В соответствии с картами сейсмического районирования ОСП-2015, согласно СП 14.13330.2014, фоновая сейсмическая интенсивность в баллах шкалы MSK-64 для средних грунтовых условий и трех степеней сейсмической опасности – А(10%), В(5%), С(1%) в течении 50 лет составляет соответственно 8, 9, 9 баллов [5,6].

А также, исходя из результатов проведенного сейсмического микрорайонирования, отмечено следующее: проведенные полевые геолого-геофизические исследования, математические и аналитические расчеты для сейсмического микрорайонирования площадки строительства объекта «Лестницы большие и Малые» середина XIX века, конец XIX века (Республика Крым, г. Керчь, ул. Театральная, ул. 23 Мая 1919 года), расположенного по адресу: Республика Крым, г. Керчь, ул. Театральная, ул. 23 мая 1919 года», позволяют утверждать, что сейсмичность на части обследованной территории не превышает 8 баллов по шкале VSK-64.

Грунты ИГЭ- 1а, 5 являются грунтами II категории по сейсмическим свойствам (таблица 1. СП 14.13330.2014).

Грунты ИГЭ- 1, 2, 3, 4 являются грунтами III категории по сейсмическим свойствам (таблица 1. СП 14.13330.2014).

Эрозионные процессы играют существенную роль в формировании рельефа и влиянии на активность склоновых гравитационных смещений. Высокая размываемость грунтов обуславливает широкое развитие процессов плоскостного смыва и линейной эрозии. В результате плоскостного смыва и линейной эрозии на участке, почти отсутствует или незначителен по мощности (до 0,1 м) почвенно-растительный слой. Процессы линейной и плоскостной эрозии активно развиваются и характерны для участков, угол падения склона на которых составляет 25-30 градусов и более; а также для участков, лишенных почвенно-растительного слоя и многолетней растительности.

Участки, на которых проявляются эрозионные процессы, отмечены в отчете геологических изысканий 170816-ПР-ИГЛ.

Осыпи наблюдаются на отдельных крутых участках склона, на участках технологических подрезок склона и в местах навалов и выходов глыб и щебня скальных и полускальных грунтов (известняков, известняков-ракушечников). Активизация данных процессов приурочена к подрезке склонов и высокой сейсмичности участка изысканий. На карте опасных процессов обозначены места проявления осыпных процессов и отмечены в отчете геологических изысканий 170816-ПР-ИГЛ.

По результатам рекогносцировочного обследования на исследуемой территории в пределах зоны влияния на существующие сооружения выделены 2 оползневых массива, имеющих весьма условные границы, оконтуривающие площади с явными оползневыми признаками. Эти оползни имеют сложный (комбинированный) механизм смещения. Оползневые массивы; предполагаемые поверхности скольжения отмечены в отчете геологических изысканий 170816-ПР-ИГЛ.

К геологическим предпосылкам формирования оползней на территории изысканий относятся:

- наличие в строении склонов обводненных, в следствии чего ослабленных разностей грунтов, большинство плоскостей скольжения тем или иным образом могут быть приурочены именно к этим зонам;

- активное техногенное освоение территории (подрезка склонов, увлажнение, пригрузки);

- общая сейсмичность территории, крупные сейсмические события, как правило, влекут за собой оползневые проявления.

Оползневой участок 1. Участок с уклоном порядка 20-35 градусов. Поверхность склона задернована крайне слабо: растительность представлена порослью трав. Возможно возникновение осыпных процессов. Направление движения оползневых масс восточное, юго-восточное, оползень асеквентный. Оползание техногенных и элювиально-делювиальных грунтов. Склон находится в неустойчивом состоянии и при сейсмических нагрузках оползень активно продолжает развиваться.

2. Оползневой участок 2. Участок с уклоном порядка 20-35 градусов. В отличии от оползневого участка 1 масштабы действия и распространения оползня на данном участке имеют меньшие размеры. Поверхность склона задернована крайне слабо: растительность представлена порослью трав и единичными кустарниками. Возможно возникновение осыпных процессов. Направление движения оползневых масс юго-восточное, оползень асеквентный. Оползание техногенных и элювиально-делювиальных грунтов. Склон

находится в неустойчивом состоянии и при сейсмических нагрузках оползень активно продолжает развиваться.

По результатам геологических изысканий (отчет 170816-ПР-ИГЛ) выделены следующие инженерно-геологические элементы:

Почвенно-растительный слой представлен суглинками от бурого до темно-бурого цвета. Данный слой распространен практически повсеместно по участку изысканий; залегает с поверхности и отсутствует на участках, на которых присутствует асфальт; мощность слоя 0,1 м. В связи с незначительной мощностью и тем, что данные грунты не будут служить основаниями зданий и сооружений, физико-механические свойства почвенно-растительного слоя не изучались.

ИГЭ-1. Насыпной грунт (культурный слой): суглинок песчанистый желто-коричневого цвета, до серовато-коричневого, от полутвердой до твердой консистенции, от легкого до тяжелого, с редкими включениями песка; с единичными включениями дресвы и щебня известняка. Распространен данный слой повсеместно, вскрыт всеми скважинами. Залегает с поверхности, местами перекрывается почвенно-растительным слоем; глубина кровли составляет от 0,0 до 0,1 м., а мощность слоя достигает от 0,4 м. до 8,5 м.

Насыпной суглинок имеет следующие физико-механические характеристики: естественная плотность грунта $\rho = 1,77 \text{ г/см}^3$;

удельное сцепление при естественной структуре $c = 0,022 \text{ кПа}$;

угол внутреннего трения при естественной структуре $\phi = 16 \text{ град}^\circ$;

общий модуль деформации $E = 29 \text{ МПа}$.

Согласно таблице 1-1 ГЭСН 81-02-01-2001 [19], ИГЭ-1 относится к 2-й группе грунтов по трудности разработки одноковшовым экскаватором.

ИГЭ-1а. Насыпной грунт: известняк-ракушечник, от бежевого до белого цвета, сильно-выветрелый, низкой прочности (предположительно фрагменты погребенных каменных строений древнего города Пантикапея). Распространен данный грунт на отдельной площадке (на вершине горы Митридат). Глубина кровли данного слоя составляет от 0,4 до 8,5 м. (подстиляет ИГЭ-1);

мощность слоя от 1,2 до 6,0 м.

Известняк-ракушечник имеет следующие физико-механические характеристики:

естественная плотность грунта $\rho = 2,33 \text{ г/см}^3$;

удельное сцепление при естественной структуре $c = 15,7 \text{ кПа}$;

угол внутреннего трения при естественной структуре $\phi = 10,6 \text{ град}$.

Согласно таблице 1-1 ГЭСН 81-02-01-2001, ИГЭ-1а относится к 5-й группе грунтов по трудности разработки одноковшовым экскаватором.

Элювиально-делювиальные отложения неогенового периода e-dN

ИГЭ-2. Глина от серовато-коричневого до желто-коричневого и коричневого цвета, от легкой до тяжелой, твердой консистенции, пылеватая. Данный слой распространен повсеместно на участке работ и вскрыт во всех скважинах; в большинстве случаев подстилает грунты ИГЭ-1;

глубина кровли слоя составляет от 0,9 до 16,9 м. и мощность от 0,3 до 36,2 м. Данный слой грунта имеет следующие физико-механические характеристики: естественная плотность грунта $\rho = 1,80 \text{ г/см}^3$;

удельное сцепление при естественной структуре $c = 0,059 \text{ кПа}$; угол внутреннего трения при естественной структуре $\phi = 22 \text{ град}^\circ$; общий модуль деформации $E = 54 \text{ МПа}$.

Согласно таблице 1-1 ГЭСН 81-02-01-2001, ИГЭ-2 относится к 2-й группе грунтов по трудности разработки одноковшовым экскаватором.

ИГЭ-3. Глина синеваато-серого цвета, от туго-пластичной до полутвердой консистенции. Встречаются прослойки песка белого, пылеватого (до 30 см) и прослойки известняка-ракушечника (до 10 см). Глины этого типа распространены на участке изысканий повсеместно и вскрыты

в 70 % скважин. Глубина кровли слоя составляет от 4,3 до 18,8 м., а мощность слоя от 1,2 до 31,3 м. Данный слой грунта имеет следующие физико-механические характеристики:

естественная плотность грунта $\rho = 1,67 \text{ г/см}^3$;

удельное сцепление при естественной структуре $c = 0,068 \text{ кПа}$;

угол внутреннего трения при естественной структуре $\phi = 23 \text{ град}$;

общий модуль деформации $E = 49 \text{ МПа}$.

Согласно таблице 1-1 ГЭСН 81-02-01-2001, ИГЭ-2 относится к 2-й группе грунтов по трудности разработки одноковшовым экскаватором.

ИГЭ-4. Песок от белого до бежевого цвета, пылеватый, средней степени водонасыщения. Данный слой грунта имеет узкое распространение на участке изысканий и вскрыт несколькими скважинами;

чаще всего встречается в виде прослоек в грунтах типа ИГЭ-2 и ИГЭ-3;

глубина кровли слоя составляет от 7,8 до 14,5 м., а мощность от 2,3 до 5,3 м. Песок имеет следующие физико-механические характеристики:

естественная плотность грунта $\rho = 1,65 \text{ г/см}^3$;

удельное сцепление при естественной структуре $c = 0,024 \text{ кПа}$;

угол внутреннего трения при естественной структуре $\phi = 18 \text{ град}$;

общий модуль деформации $E = 10 \text{ МПа}$.

Согласно таблице 1-1 ГЭСН 81-02-01-2001, ИГЭ-2 относится к 2-й группе грунтов по трудности разработки одноковшовым экскаватором.

ИГЭ-5. Известняк от белого до бежевого цвета, местами выветрелый, трещиноватый, средней прочности. Данный слой грунта имеет узкое распространение на участке изысканий и вскрыт несколькими скважинами;

чаще всего встречается в виде прослоек в грунтах типа ИГЭ-2 и ИГЭ-3;

глубина кровли слоя составляет от 11,5 до 16,4 м., а мощность от 0,5 до 1,3 м. Известняк имеет следующие физико-механические характеристики: естественная плотность грунта $\rho = 2,41 \text{ г/см}^3$;

удельное сцепление при естественной структуре $c = 25,9 \text{ кПа}$;

угол внутреннего трения при естественной структуре $\phi = 21,8 \text{ град}$.

Согласно таблице 1-1 ГЭСН 81-02-01-2001, ИГЭ-2 относится к 5-й группе грунтов по трудности разработки одноковшовым экскаватором.

Специфическими грунтами площадки являются техногенные грунты ИГЭ-1

Техногенные отложения ИГЭ-1 (tIV) представлены насыпными грунтами (культурный слой): суглинок песчанистый желто-коричневого цвета, до серовато-коричневого, от полутвердой до твердой консистенции, от легкого до тяжелого, с редкими включениями песка; с единичными включениями дресвы и щебня известняка. Данный слой распространен повсеместно на территории изысканий и вскрыт всеми скважинами. Мощность слоя от 0,4-8,50 м.

Техногенные отложения ИГЭ-1a (tIV) представлены известняком-ракушечником, от бежевого до белого цвета, сильно-выветрелым, низкой прочности. Данный известняк-ракушечник очень похож на остатки построек (стен, зданий, сооружений), оставшихся со времен древнего города Пантикапея; слой вскрыт преимущественно в верхней части горы Митридат и был встретился в пяти скважинах; мощность слоя составила от 1,2 до 6,0 м [7,8].

Элювиально-делювиальные отложения ИГЭ-2 (e-dN) представлены глиной от серовато-коричневого до желто-коричневого и коричневого цвета, от легкой до тяжелой, твердой консистенции, пылевой. Данный слой распространен повсеместно на территории изысканий и вскрыт всеми скважинами. Мощность слоя от 1,3 до 36,2 м.

Основания, сложенные специфическими грунтами, должны проектироваться с учетом их особенностей и с применением специальных мероприятий, рекомендуемых для каждого определенного вида грунта и в соответствии с конструктивными особенностями проектируемого сооружения (рис.1,2).

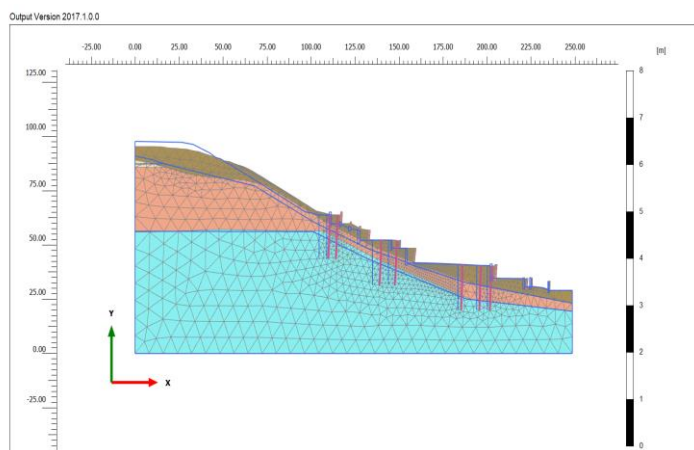


Рис. 1. Моделирование элементов усиления в расчетном комплексе PLAXIS

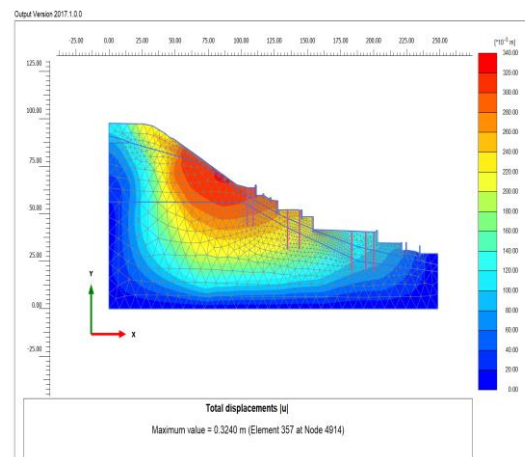


Рис. 2. Деформированная схема при устройстве свайного укрепления

Геологические и инженерно-геологические процессы на изучаемой территории представлены: активные и стабилизировавшиеся оползневые процессы, осыпные процессы, эрозионные процессы (плоскостной смыв и линейная эрозия), проседание грунта [9,10].

При проектировании и производстве последующих работ рекомендуется:

- остановить активные и предотвратить возможное возникновение и дальнейшее развитие опасных геологических процессов (эрозионные процессы, осыпные процессы, оползневые процессы) путем укрепления склонов, закрепления неустойчивых слоев грунта и организации поверхностного стока.

- учитывать особенности проектирования зданий и сооружений на насыпных и набухающих грунтах, на оползнеопасных и сейсмоопасных территориях.

- в качестве оснований и несущего слоя рекомендуется использовать грунты ИГЭ-3.

Целью проведения поверочных расчетов является выявление качественных и количественных характеристик напряженно деформированного состояния. При построении конечно-элементной геотехнической модели учитывались подземная часть (рис.3..5).

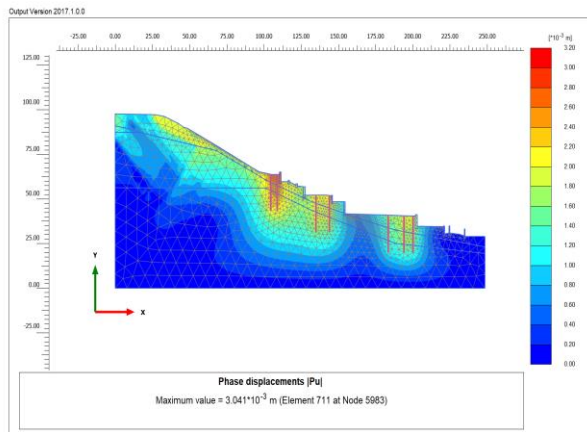


Рис. 3. Изополя дополнительных перемещений вызванных устройством свайного основания

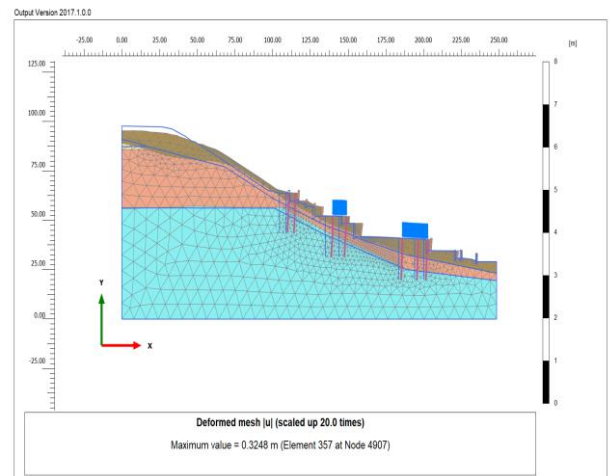


Рис. 4. Деформированная схема при нагружении

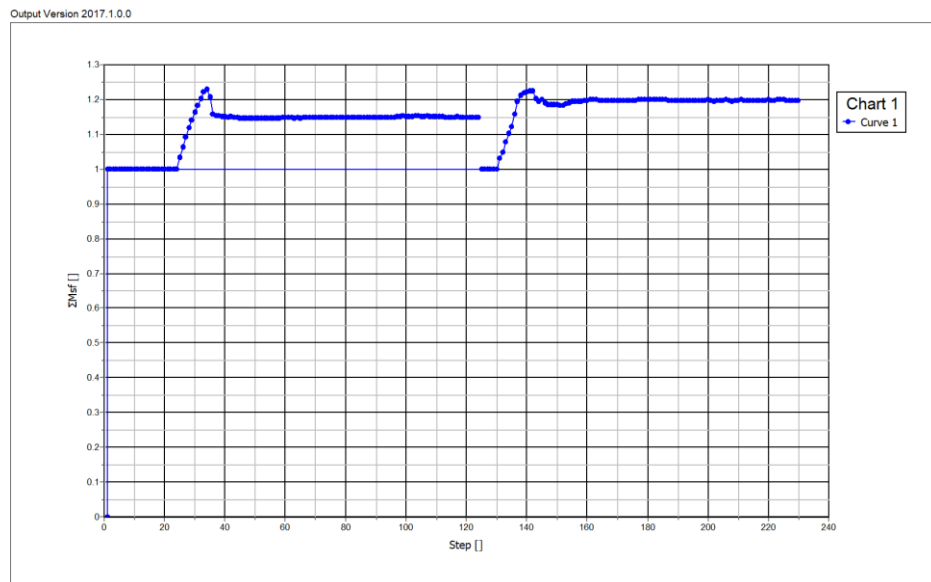


Рис. 5. График изменения коэффициента устойчивости. Коэффициент устойчивости более 1,2 (график справа), устойчивость склона обеспечена

Таким образом, используя расчетную программу PLAXIS можно смоделировать массивы горных пород на объектах культурного наследия.

Библиографический список литературы:

1. Попов А.О., Маилян Л.Р., Сабитов Л.С., Данилов А.М., Гарькин И.Н. Системный подход к анализу технического состояния объектов культурного наследия на примере корпуса «Орешек» Шлиссельбургской крепости // Региональная архитектура и строительство 2023. № 4 (57). С. 199-205

2. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Системный анализ как методология решения проблем // Региональная архитектура и строительство. -2023. - № 2 (55). - С. 14-20.
3. Саденко Д.С., Гарькин И.Н., Маилян Л.Р., Сабитов Л.С. Виброметрические методы диагностики строительных конструкций // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 3 (59). С. 175-189.
4. Каракова Т.В., Данилова А.В. Художественная перфорация как инструмент формообразования архитектуры общественного здания в контексте эмерджентности системы // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 1 (46). С. 211-219
5. Селютина Л. Ф. Ратькова Е. И., Корнеев А. А. Анализ состояния и возможностей сохранения объекта культурного наследия в Повенце // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 1(54). С. 186-195.
6. Макаревич Е. А., Селютина Л. Ф. Объект истории архитектуры и культурного наследия: часовня Николая Чудотворца в Мелойгубе (Республика Карелия) // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 2(51). С. 175-183.
7. Попов А.О., Матвеев И.Ю., Бирюлева Д.К. Прочность по нормальным сечениям и деформативность кирпичных цилиндрических сводов, усиленных углеродными холстами // Известия КГАСУ. - 2015. -№ 2 (32). - С. 168–175.
8. Стрелков Ю. М., Сабитов Л. С., Клюев С. В., Клюев А.В., Радайкин О.В., Токарева Л.А. Технологические особенности конструирования сборно-разборного фундамента под башенные сооружения // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 3. – С. 17-26. – DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-3-17-26.
9. Соловьев Д.Б., Копотилова В.Г., Катюк Д.П., Пирус А.В., Григорюк В.А., Крылова А.И. // Сравнение эффективности использования технологий bim и cad с помощью математической модели // Строительные материалы и изделия. 2021. Т. 4. № 1. С. 18 – 26
10. Щепетова В.А., Балюков А.Е. Прогнозирование и разработка сценариев аварийных ситуаций в газовой котельной (на примере предприятия г. Пенза) // Проблемы региональной экологии. 2019. № 2. С. 65-68.