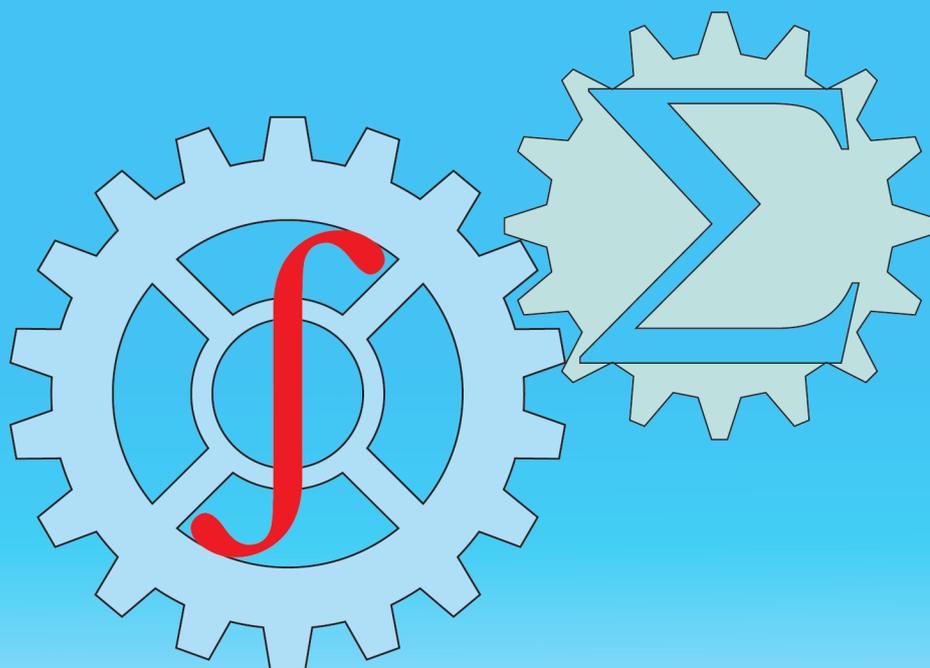




ISSN: 2010-7250
Published from 1992

Институт механики и сейсмостойкости сооружений
Mechanika va inshootlar seysmik mustahkamligi instituti

МЕХАНИКА МУАММОЛАРИ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ PROBLEMS OF MECHANICS



2025
Volume 34
No: 4

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

МЕХАНИКА
МУАММОЛАРИ

O‘ZBEKISTON
JURNALI

4

2025

УЗБЕКСКИЙ
ЖУРНАЛ

ПРОБЛЕМЫ
МЕХАНИКИ

Журнал под таким названием издается с января 1992 г.

Ташкент – 2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор – докт. физ.-мат. наук, проф. К.С. СУЛТАНОВ
Заместитель главного редактора – докт. физ.-мат. наук Р.А. АБИРОВ
Заместитель главного редактора – PhD Н.А. НИШОНОВ
Ответственный секретарь – докт. тех. наук М.М. ХАМДАМОВ

Абдикаримов Р.А. д.ф.-м.н., проф. (Ташкент)	Мирсаидов М. д.т.н., проф., акад. АН РУз (Ташкент)
Абдусаттаров А. д.т.н., проф. (Ташкент)	Мухаммадиев Д.М. д.т.н., проф. (Ташкент)
Азимов Д. д.т.н., проф. (США)	Панахов Г.М. д.т.н., проф., член-корр. НАНА (Баку)
Алдошин Н.В. д.т.н., проф. (Москва)	Паровик Р. д.ф.-м.н. (Петропавловск-Камчатский)
Алимухамедов Ш.П. д.т.н., проф. (Ташкент)	Ризаев А.А. д.т.н., проф. (Ташкент)
Ахмедов А.Б. д.ф.-м.н., проф. (Ташкент)	Сагдиев Х.С. к.т.н. (Ташкент)
Бахадиров Г.А. д.т.н., проф. (Ташкент)	Сирожиддинов З. д.т.н., проф. (Самарканд)
Быковцев А.С. д.ф.-м.н., проф. (США)	Старовойтов Э.И. д.ф.-м.н. (Гомель, Беларусь)
Ватин Н.И. д.т.н., проф. (Санкт-Петербург)	Тохилов Ш.М. к.ф.-м.н. (США)
Дусматов О.М. д.ф.-м.н., проф. (Самарканд)	Тухтакузиев А.Т. д.т.н., проф. (Ташкент)
Зубарев А.Ю. д.ф.-м.н., проф. (Екатеринбург)	Юлдашев Ш.С. д.т.н., проф. (Наманган)
Исмоилова С.И. д.т.н., проф. (Ташкент)	Худайкулиев Р.Р. к.т.н. (Ташкент)
Казанцев С.П. д.т.н., проф. (Москва)	Хужаев И.К. д.т.н., проф. (Ташкент)
Кузнецов С.В. д.ф.-м.н., проф. (Москва)	Хужаёров Б.Х. д.ф.-м.н., проф. (Самарканд)
Маликов З.М. д.т.н., проф. (Ташкент)	Хусанов Б.Э. д.т.н. (Ташкент)
Мамасаидов М.Т. д.т.н., проф., акад. НАН КР (Ош)	Шардаков И.Н. д.ф.-м.н., проф. (Пермь)
Мардонов Б.М. д.ф.-м.н., проф. (Ташкент)	Эргашов М. д.т.н., проф. (Ташкент)
Матвеев В.П. д.т.н., проф., акад. РАН (Пермь)	Ювмитов А.С. д.т.н., с.н.с. (Ташкент)

Адрес редакции:

*100125, Ташкент, Академгородок, Дурмон йули, 40.
Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз*

*Телефон: +99855 520-02-45
+99855 520-04-46*

E-mail: instmechofficial@gmail.com

Технический редактор: Михайлова В.В.

Журнал зарегистрирован Агентством по печати и информации Республики Узбекистан 22.12.2006 г.
Регистрационный номер 0050.

Номер одобрен на заседании редакционной коллегии журнала 25.12.2025

Сдано в набор 15.12.2025. Подписано в печать 29.12.2025.

Формат 60×84 1/8. Гарнитура Times New Roman. Ризография.

Усл.- печ. л. 6.5. Уч.-изд. л. 6.82. Тираж 130.

Цена договорная.

Отпечатано в типографии ООО “Munis design group”:

100170, г. Ташкент, ул. Буз-2, презд, дом 17-А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН МЕТОДОМ КРУГЛО-ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АЛГОРИТМА НАХОЖДЕНИЯ ЦЕНТРА ОКРУЖНОСТИ

Норматов Ш.И.

Институт механики и сейсмостойкости сооружений им.М.Т.Уразбаева АН РУз, Ташкент
Узбекистан

E-mail: shovkatnormatov871@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена расчету устойчивости откосов грунтовых плотин с использованием метода кругло-цилиндрических поверхностей скольжения. В отличие от традиционного подхода, описанного в нормативных документах, в статье предлагается альтернативный способ определения центра окружности скольжения, что позволяет точнее оценить коэффициент запаса устойчивости. Основное внимание уделено поиску минимального значения коэффициента устойчивости, который достигается на поверхности скольжения. В статье рассмотрены теоретические основы метода кругло-цилиндрических поверхностей скольжения, включая уравнение предельного равновесия Кулона, и предложен алгоритм для определения наиболее опасных центров и радиусов кривых скольжения. Разработана программа для автоматизированного расчета устойчивости откосов, которая позволяет учитывать различные геометрические параметры откосов и неоднородность грунтового массива. Программа была протестирована на нескольких вариантах исходных данных, включая различные значения сцепления грунта и угла внутреннего трения. Результаты расчетов показали, что уменьшение сцепления грунта и угла внутреннего трения приводит к снижению коэффициента устойчивости.

Ключевые слова: устойчивость откосов, грунтовые плотины, метод кругло-цилиндрических поверхностей скольжения, коэффициент запаса устойчивости, уравнение Кулона, автоматизированный расчет, сцепление грунта, угол внутреннего трения.

Введение. В процессе строительства и эксплуатации промышленных, транспортных и грунтовых объектов возникает вопрос об устойчивости откосов грунтовых массивов. Под устойчивостью грунтовых массивов обычно понимают их способность в течение длительного времени противостоять сдвигающим усилиям, сохраняя свою форму. Устойчивое положение откосов определяется соответствующим напряжённо-деформированным состоянием, формируемым силовыми воздействиями. При неблагоприятном сочетании разнообразных факторов грунтовый массив, ограниченный откосом, может перейти в неравновесное состояние и потерять устойчивость. Большинство из существующих методов расчета устойчивости откосов грунтового массива было разработано для вычисления коэффициента устойчивости откоса. Все расчетные методы оценки степени устойчивости откосов и склонов основаны на применении теории предельного равновесия, рассматривающей предельное напряженное состояние грунтового массива.

Разнообразие горно-геологических и технических условий возведения плотин или освоения открытых разработок обусловило создание многочисленных методов расчета (расчетных схем) устойчивости откосов. Их насчитывается к настоящему времени около 150 [3]. Множество методов, способов и приемов расчета на устойчивость откосов привело к необходимости их классификации по тем или иным признакам. В качестве основного признака в классификациях для расчета в [4-6] принимается форма поверхности разрушения (скольжения). По такой классификации в [5] выделено четыре класса методов определения параметров устойчивости откоса:

а) построение контура откоса, во всех точках которого удовлетворяется условие предельного равновесия, в этом случае решается система дифференциальных уравнений равновесия совместно с условием предельного состояния, основы которого заложены в [7];

б) построение контура откоса, вдоль которого удовлетворяется условие равенства угла наклона касательной углу сопротивления сдвигу (основы такого метода приведены в [8]);

в) построение в массиве откоса поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие предельного равновесия (методы расчета этого класса наиболее многочисленны и включены в КМК, они основаны на принятии в расчетных схемах той или иной формы поверхности скольжения: плоской, кругло-цилиндрической, в виде логарифмической спирали, сложной криволинейной, ломаной и т.д.);

г) построение в массиве откоса поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие специального предельного равновесия (для неоднородных и анизотропных массивов).

Постановка задачи. На практике широкое применение получил метод оценки устойчивости и сейсмостойкости откосов плотин, дамб, карьерных бортов и т.д., предполагающий выполнение условия предельного равновесия (предельно-напряженного состояния) по внутренней границе некоторой области приоткосной зоны грунтового массива. Граница этой области считается предполагаемой поверхностью разрушения (поверхностью скольжения). Перечисленные выше методы принципиально основаны на решении уравнения предельного равновесия Кулона. Предельно-напряженное состояние, т.е. уравнение предельного равновесия (закон Кулона), имеет вид [1-3]:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (1)$$

где σ , τ - нормальное и касательное напряжения, действующие на площадках поверхности скольжения, C - сцепление грунтового массива, φ - угол внутреннего трения.

Расчет устойчивости откосов плотин, дамб или бортов карьеров заключается в определении минимального коэффициента устойчивости при принятом очертании поперечного профиля грунтового массива и производится для наибольших неблагоприятных поперечных сечений характерных участков массива. В настоящее время при проектировании грунтовых плотин и разработке карьеров, устойчивость откосов рассчитывают по методу, основанному на кругло-цилиндрических поверхностях скольжения (КЦПС). Данный метод впервые был предложен в 1916 г. шведскими инженерами Петерсоном и Гюлтином на основе исследований обрушения глинистых грунтов. В КМК рекомендовано проводить расчет устойчивости откосов по методам кругло-цилиндрических поверхностей скольжения (метод НИИ ВОДГЕО); он заключается в нахождении таких радиусов и положений центров кривых скольжения, при которых коэффициент устойчивости будет наименьшим. Существуют различные подходы и способы определения геометрического центра КЦПС [9-15]. Самые простые и широко используемые способы приведены в [9-15]: расчет для плотины производится для ряда точек центров кривых скольжения, выбираемых в так называемой области центров наиболее опасных кривых (рис. 1). Эта область расположена между двумя прямыми, восстановленными из центра откоса под углом 85° и перпендикулярно к основанию плотины. Между этими прямыми из центра откоса проводятся две дуги окружности с радиусами, зависящими от величины заложения откосов и высоты плотины.

В этой области принимают ряд точек центров, последовательно приближаясь к наиболее опасной области. Из каждой точки проводят окружность скольжения с таким радиусом, чтобы он прошел через гребень плотины и захватил часть основания на глубину $H/2$, H - высота плотины. В пределах кривой скольжения откос и основание плотины разбивают на ряд отсеков (столбиков) одинаковой ширины, в зависимости от радиуса кривой скольжения. На вертикали, опущенной из центра кривой скольжения, находится средняя линия начального отсека (столбика). Нумерация средних линий вверх по откосу – положительная, вниз по откосу – отрицательная. Начальная средняя линия имеет номер «0» (рис. 2).

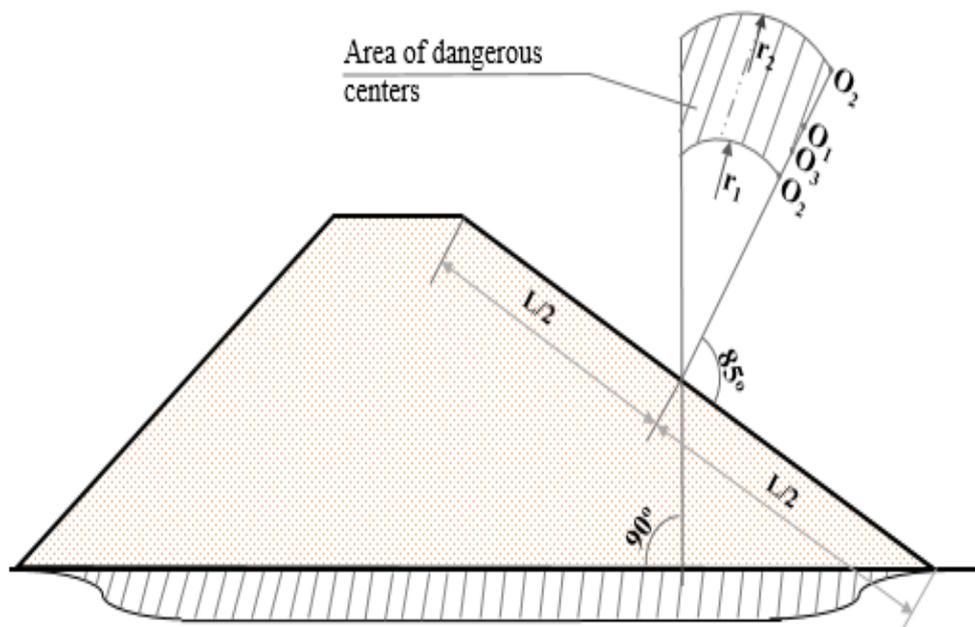


Рис. 1. Схема определения области опасных центров КЦПС

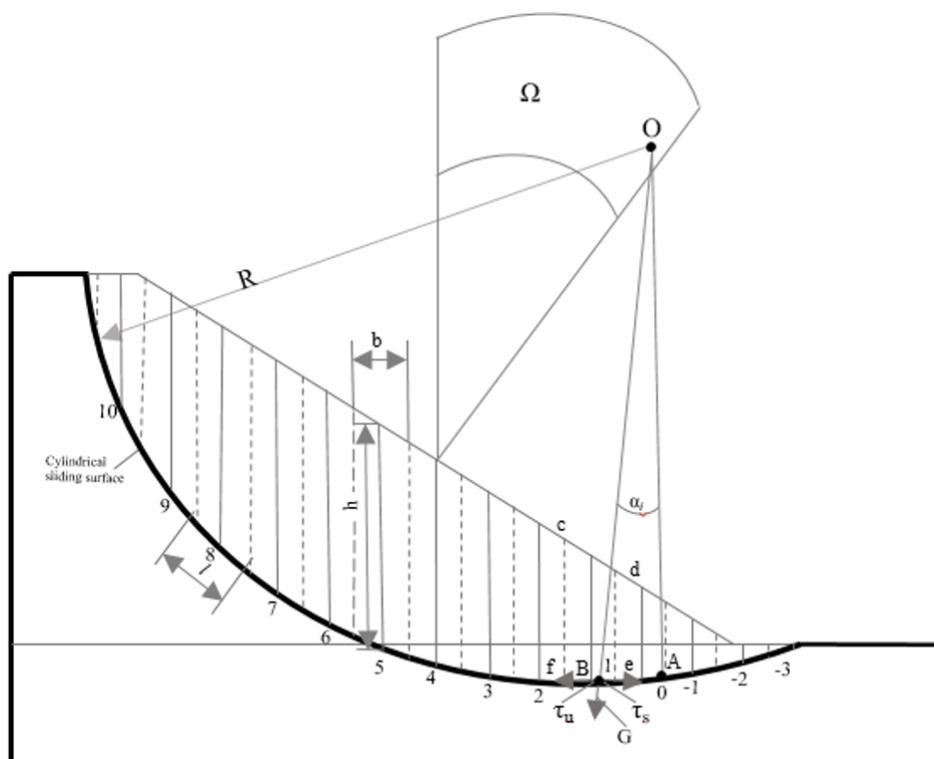


Рис. 2. Схема расчёта устойчивости откоса методом КЦПС

Для каждого отсека определяется вес отсека и все силы, действующие на отсек. Угол α между вертикалью, опущенной из центра кривой скольжения, и линией, проведенной из этого центра к центру основания каждого отсека, будет определяться синусом угла: $\sin \alpha = bn/R$, n - порядковый номер отсека, b - ширина отсека, R - радиус КЦПС.

Коэффициент устойчивости вычисляется по формуле

$$K_{уст} = \frac{F_{y\delta}}{F_{с\delta\delta}}, \quad (2)$$

где $F_{y\delta}$ - сумма всех удерживающих сил, $F_{сдв}$ - сумма всех сдвигающих сил [9].

Проверка устойчивости откоса в [10] и других работах сводится к определению коэффициента устойчивости, который равен (если не считать сил бокового давления) отношению момента удерживающих сил (трения и сцепления) к моменту сдвигающихся сил:

$$K_{уст} = \frac{\sum M_{y\delta}}{\sum M_{сдв}} \quad (3)$$

Коэффициенты устойчивости, определяемые через (2) и (3), практически эквивалентны. При предельно-напряженном состоянии грунтового массива формула (3), предложенная К. Терцаги [9], принимает вид:

$$K_{уст} = \frac{\sum M_{y\delta}}{\sum M_{сдв}} = \frac{\int R \tau_{np} dl}{\int R \tau_{акт} dl} = \frac{\sum \tau_{np} \Delta l}{\sum \tau_{акт} \Delta l}, \quad (4)$$

где τ_{np} - предельное значение касательного напряжения, оно определяется с помощью предельно-напряженного состояния (1); $\tau_{акт}$ - касательное напряжение, активно действующее вдоль предполагаемой кривой (поверхности) обрушения. С учётом (1) коэффициент устойчивости по методу Терцаги имеет вид [9, 12-14]:

$$K_{уст} = \frac{\sum [(G_i - P_b b_i) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi + C b_i / \cos \alpha_i]}{\sum G_i \sin \alpha_i} \quad (5)$$

На основе проведенного анализа методов расчета устойчивости грунтовых сооружений можно констатировать следующее:

а) расчет устойчивости откосов грунтовых плотин, горных и карьерных откосов при инженерных расчётах, определяется преимущественно методом КЦПС. В данном методе поверхности скольжения заранее задаются способами, основанными на результатах многолетних натуральных наблюдений за оползнями, обрушениями откосов грунтового массива, бортов карьеров и т.д.;

б) кругло-цилиндрические поверхности скольжения (обрушения) можно считать наиболее обоснованными поверхностями, по которым происходит потеря устойчивости откосов и бортов карьеров, что подтверждается результатами натуральных наблюдений на протяжении последних ста лет;

в) расчетные формулы по методу КЦПС являются наиболее простыми и удобными для определения коэффициента прочности и устойчивости откосов грунтовых массивов. Преимуществом этих формул также является то, что в них используются основные прочностные показатели грунтов – сцепление и угол внутреннего трения, которые общеизвестны и являются основными характеристиками массива горных пород.

Метод расчета КЦПС включает в себя две процедуры:

- а) определение наиболее опасных центров КЦПС;
- б) нахождение опасных радиусов КЦПС.

После этого оценивается устойчивость откосов грунтового массива. Как было отмечено, существует множество способов определения центра КЦПС. Наиболее точное определение центра КЦПС приведено в [12]: некоторая предполагаемая область опасных центров разбивается на сетки и для узловых точек вычисляется коэффициент устойчивости. Далее, по определенным значениям коэффициента устойчивости строится изолиния этих значений.

В методах, приведенных в [12] и др., разработанных зарубежными исследователями, радиус КЦПС практически не варьируется и считается равным минимальному отрезку от центра КЦПС до основания, т.е. считается, что КЦПС проходит через точку пересечения

откоса и основания (в случае одинаковых или наиболее прочных оснований такое утверждение считается верным) [12-14]. Однако, для инженерной практики такой подход требует знания математических дисциплин и вмешательства промежуточных работ, что является неприемлемым для инженеров и проектировщиков.

Таким образом, из анализа методов расчета на устойчивость и прочность откосов грунтовых массивов следует отсутствие единого подхода для определения предполагаемого центра и радиуса КЦПС.

Нами предлагается один из способов определения центра и радиуса КЦПС, а также коэффициента устойчивости откоса. Для этого создан алгоритм и составлена программа расчета устойчивости откоса грунтового массива. В качестве исходных, кроме механических и прочностных характеристик массива, задаются геометрические данные приоткосного массива (рис. 5): начальная координата прикреплена к пересечению откоса с основанием; координаты вершины откоса x_A, y_A (точки А); область искомых опасных центров КЦПС - левая (x-координата точки В) $x_B \approx 5 \div 10 \cdot x_A$ и верхняя (y-координата точки С) $y_C \approx 5 \div 10 \cdot y_A$, для определения радиуса КЦПС – x-координата точки а $x_a \approx 1.1 \div 1.5 \cdot x_A$. Область предполагаемого центра КЦПС (область $OABC$ на рис. 3) разбивается на N_x и N_y подобластей (сеток). Для каждого узла этой сетки, варьируя значения радиуса КЦПС от значений R_a до наименьшего (равного значению расстояния от центра до откоса), вычисляется коэффициент устойчивости по формуле (2) и определяется радиус, при котором наблюдается наименьшее значение коэффициента. Далее, из всех узлов по значениям коэффициента устойчивости находим центр КЦПС. Созданная программа выводит на печать десять таких центров (координаты центров) и соответствующие радиусы КЦПС и значения коэффициента устойчивости.

Численные результаты и их анализ. Необходимо отметить, что, принимая достаточно большие значения для N_x и N_y можно с необходимой точностью определить искомый центр и радиус КЦПС. Программа расчета была модифицирована на последовательное определение центра КЦПС: по найденным 10 значениям центров автоматически составляется новая область искомых центров, включающая эти центры, и далее, повторяется нахождение следующих – новых - центров и радиусов КЦПС. Вычисления показали, что для оптимального определения центра и радиуса достаточно 2-3 этапа таких вычислений.

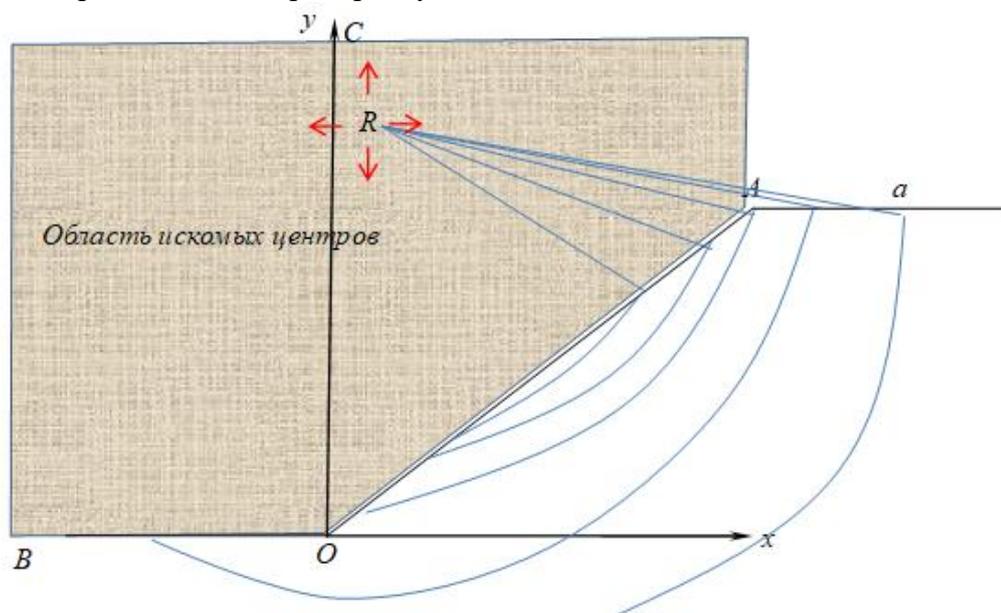


Рис. 3. Схема для задания исходных геометрических данных

Отметим также, что программа составлена таким образом, чтобы можно было задать различный профиль откоса (двух, трех или многоступенчатый, ввод в виде функции) и учитывать неоднородность грунтового массива.

Работоспособность составленной программы проверялась оценкой устойчивости откоса грунтового массива по методу Терцаги, т.е. по формуле (5). Расчеты были проведены для различных вариантов исходных данных и показаны в табл. 1.

Таблица 1

Варианты расчетов						
Варианты	Плотность, ρ , кг/м ³	Сцепление, C , КПа	Тангенс угла внутреннего трения, $\text{tg}\varphi$	Высота плотины, H , м	Наклон	$(K_{уст})_{\min}$
1	2600	30	0.56	160	1.1	1.779
2	2600	20	0.56	160	1.1	1.6623
3	2600	40	0.56	160	1.1	1.8830
4	2600	50	0.56	160	1.1	1.9791
5	2600	30	0.42	160	1.1	1.4123
6	2600	30	0.36	160	1.1	1.2522

Результат 1-го варианта расчета приведен в табл. 2. Самая неблагоприятная поверхность возможного обрушения показана на рис. 4. Как видно из результатов расчета этого варианта, значение коэффициента устойчивости равно 1.779, т.е. откос является вполне устойчивым.

Таблица 2

Результат 1-го варианта расчета

$K_{уст}$	Радиус, м	Координаты центра КЦПС		Границы возможного скольжения	
		R_x , м	R_y , м	x_{left} , м	x_{right} , м
1.3222	531.1725	-30.4416	530.6918	0.9304	357.6291
1.3223	535.4221	-30.4416	535.0464	1.1621	359.3709
1.3223	526.9304	-30.4416	526.3373	0.6809	355.8873
1.3223	549.0514	-37.6992	548.1101	0.8637	358.5000
1.3223	553.3264	-37.6992	552.4646	1.0322	360.2418
1.3224	513.3906	-23.1840	513.2736	0.9374	356.7582
1.3224	544.7833	-37.6992	543.7555	0.6785	356.7582
1.3224	517.6123	-23.1840	517.6282	1.2335	358.5000
1.3224	522.4823	-23.1840	521.9827	0.0346	361.1127
1.3224	509.1771	-23.1840	508.9190	0.6225	355.0164

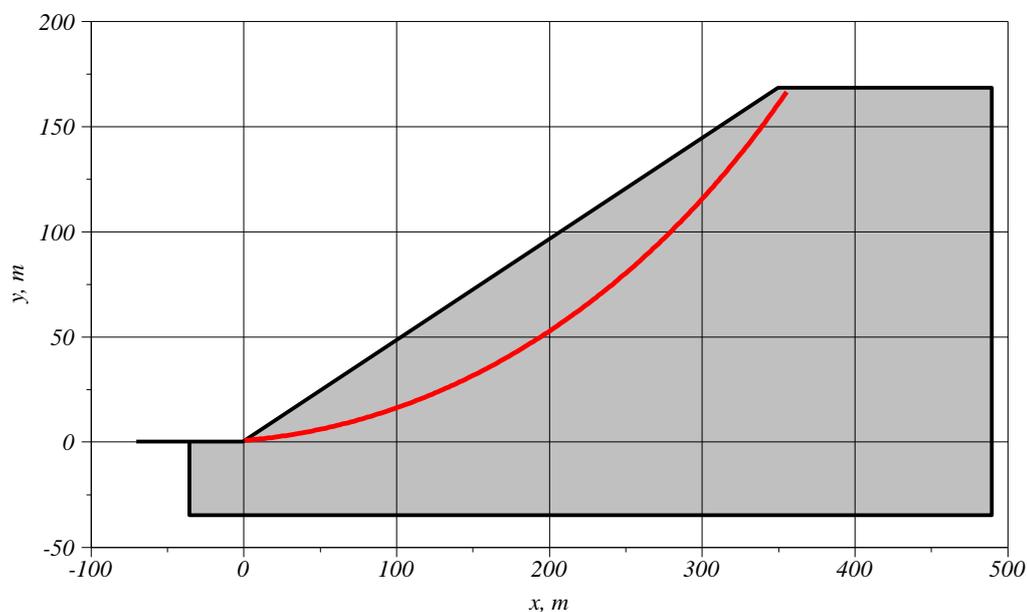


Рис. 4. Профиль поверхности возможного обрушения

Последующие результаты вариантов расчета приведены в табл. 3 – 5.

Таблица 3

Результаты расчетов. Вариант 2

$K_{уст}$	Радиус, м	Координаты центра КЦПС		Границы возможного скольжения	
		R_x , м	R_y , м	x_{left} , м	x_{right} , м
1.2844	574.6578	-51.1840	572.3827	0.0227	357.1127
1.2844	587.7944	-58.4416	585.4464	1.4902	355.3709
1.2844	583.4785	-58.4416	581.0918	1.4482	353.6291
1.2845	569.7386	-51.1840	568.0282	1.5276	354.5000
1.2845	601.5865	-65.6992	598.5101	1.4145	354.5000
1.2845	605.9220	-65.6992	602.8646	1.3928	356.2418
1.2845	592.1161	-58.4416	589.8010	1.5178	357.1127
1.2846	574.0394	-51.1840	572.3827	1.6188	356.2418
1.2846	610.2628	-65.6992	607.2192	1.3579	357.9836
1.2847	619.7616	-72.9568	615.9283	1.3205	355.3709

Таблица 4

Результаты расчетов. Вариант 3

$K_{уст}$	Радиус, м	Координаты центра КЦПС		Границы возможного скольжения	
		R_x , м	R_y , м	x_{left} , м	x_{right} , м
1.3564	476.5766	-2.4416	476.5824	0.0253	360.7418
1.3564	493.4602	-9.6992	494.0006	1.3853	360.7418
1.3565	506.9159	-16.9568	507.0643	0.9698	359.8709
1.3565	489.2804	-9.6992	489.6461	1.0059	359.0000
1.3566	485.1099	-9.6992	485.2915	0.6064	357.2582
1.3566	502.7127	-16.9568	502.7098	0.6354	358.1291
1.3568	511.1276	-16.9568	511.4189	1.2852	361.6127
1.3568	475.9133	-2.4416	476.5824	1.4267	359.8709
1.3568	471.7688	-2.4416	472.2278	0.9822	358.1291
1.3569	480.9490	-9.6992	480.9370	0.1866	355.5164

Как видно из вариантов, приведенных в табл. 2, расчеты проведены для геометрии плотины. В исходных данных варьировались значения сцепления грунта и тангенс угла внутреннего трения. Из результатов оценки устойчивости откоса плотины можно констатировать, что уменьшение сцепления грунта приводит к уменьшению значения коэффициента устойчивости (варианты 1-4), к такому выводу также приводит снижение тангенса угла внутреннего трения. Для варианта 1-4 центры и радиусы КЦПС, а также их местоположения приведены на рис. 5.

Таблица 5

Результаты расчетов. Вариант 4

$K_{уст}$	Радиус, м	Координаты центра КЦПС		Границы возможного скольжения	
		R_x , м	R_y , м	x_{left} , м	x_{right} , м
1.3882	460.7122	5.9360	460.8307	0.3182	361.6127
1.3883	478.1304	-1.3216	478.2490	0.2524	362.4836
1.3885	460.0402	5.9360	460.8307	1.6877	360.7418
1.3886	473.3196	-1.3216	473.8944	1.2117	359.8709
1.3887	455.9306	5.9360	456.4762	1.1882	359.0000
1.3888	477.4681	-1.3216	478.2490	1.6461	361.6127
1.3888	495.6819	-8.5792	495.6672	0.1288	363.3546
1.3889	464.8302	5.9360	465.1853	0.7989	363.3546
1.3889	490.8453	-8.5792	491.3126	1.1756	360.7418
1.3889	469.1813	-1.3216	469.5398	0.7566	358.1291

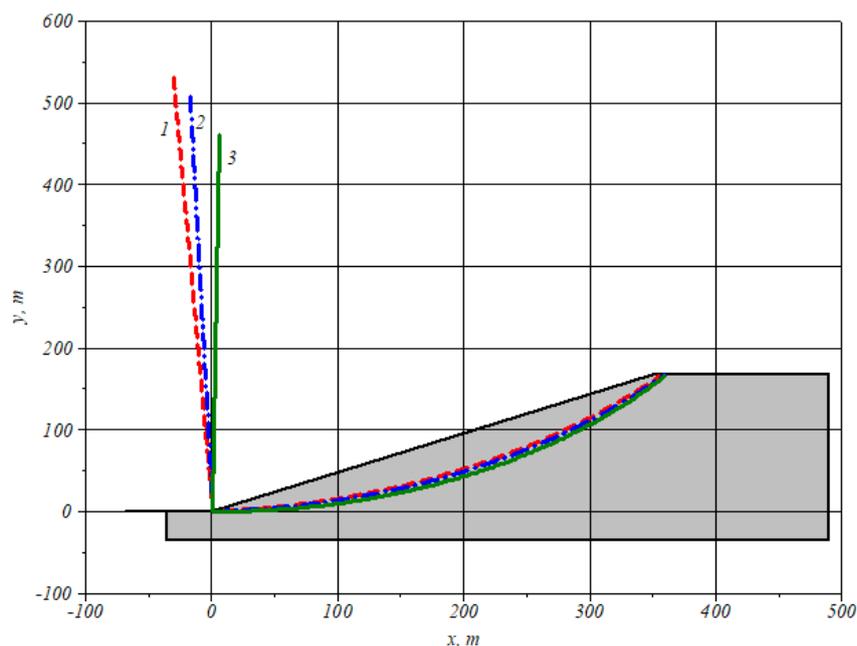


Рис. 5. Центры и радиусы КЦПС для вариантов 2-4 (соответственно кривые 1-3)

Отметим, что приведенные результаты не претендуют на полноту исследования устойчивости откоса плотины, а лишь показывают работоспособность разработанной методики и программы расчета.

Заключение. Использование в инженерной практике большого числа расчетных методов для оценки устойчивости грунтовых массивов свидетельствует о сложности задачи и незавершенности процесса поиска ее решения, которое удовлетворяло бы исследователей и проектировщиков.

Определение наиболее опасной кругло-цилиндрической поверхности скольжения существующими методами, путем выделенной области не гарантирует нахождение минимума значения коэффициента устойчивости, поскольку возможно существование нескольких локальных минимумов в других областях.

Многообразие трактовок коэффициента устойчивости свидетельствует о том, что коэффициент устойчивости дает, по существу, лишь относительную оценку устойчивости, выявляя меру устойчивости в рамках расчетных предпосылок применяемого метода, поэтому разработка универсального метода для количественной оценки устойчивости остается пока нерешенной проблемой.

Разработана методика определения центра и радиуса КЦПС и реализована на ЭВМ. Путем сравнения результатов с другими методами, показано преимущество методики и область, обеспечивающая минимум коэффициента устойчивости, лежащий за пределами выделенной области при применении традиционных способов.

На основании вышеизложенного, можно сделать следующие выводы.

Метод кругло-цилиндрических поверхностей скольжения является эффективным инструментом для оценки устойчивости откосов, особенно при наличии неоднородных грунтовых условий.

Предложенный алгоритм и программа позволяют точнее определять опасные поверхности скольжения и минимизировать коэффициент устойчивости.

Результаты расчетов подтверждают, что метод кругло-цилиндрических поверхностей скольжения может быть успешно применен для анализа устойчивости грунтовых плотин и других инженерных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Huang Y.H. Slope Stability Analysis by the Limit Equilibrium Method. Slope Stability Analysis by the Limit Equilibrium Method: Fundamentals and Methods. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014, 365 p.
- [2] Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc. Printed in the USA, 2001, 526 p.
- [3] Usarov M., Ayubov G., Usarov D., Mamatisaev G. Spatial Vibrations of High-Rise Buildings Using a Plate Model // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022, Vol 182, pp. 403–418.
- [4] Usarov M., Mamatisaev G., Ayubov G., Usarov D., Khodzhaev D. Dynamic calculation of boxed design of buildings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020, Vol. 883, P. 012186.
- [5] Usarov M., Mamatisaev G., Usarov D. Calculation of compelled fluctuations of panel buildings // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022, Vol. 1076, P. 02002.
- [6] Usarov M., Usarov D., Mamatisaev G. Calculation of a spatial model of a box-type structure in the LIRA design system using the finite difference method // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022, Vol.403, pp.1267–1275.
- [7] Khusanov B., Khaydarova O. Stress-strain state of earth dam under harmonic effect // E3S Web of Conferences. 2019, Vol. 97, P.05043.
- [8] Bakhtiyar K., Barno R. Numeric Simulation of Subsidence of Loess Soil under Wetting in a Limited Area // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2023, Vol.104, No. 2, pp. 1-18.
- [9] Sultanov K.S., Khalikulov E.K., Loginov P. V. Definition of dynamic loads on conveyor bearing edge of Muruntau open pit // Gorn. Zhurnal. 2013, Vol. 8, No. 1, pp. 36–39.
- [10] Duncan J.M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering // Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering. 2000, Vol. 126, No. 4, pp. 307–316.
- [11] Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general-slip surface // Geotechnique. 1965, Vol. 15, No. 1, pp. 70–93.
- [12] Barton N.R., Bandis S. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice // Rock joints: Proc. Int. Symp. on Rock Joints / N.Barton, O.Stephansson, eds. Rotterdam: Balkema. 1990, pp. 603-610.
- [13] Zhang Z., Chang C., Zhao Z. Influence of the Slope Shape on Seismic Stability of a Slope // Advances in Civil Engineering. 2020, Vol. 2020, Article ID 8826564, 8 p.
- [14] Bakhtiyar K., Shovkat N., Ozodalron K. On one method for assessing the soil slope stability // AIP Conf. Proc. 2022, Vol.2637, P.030012.
- [15] Sultanov K., Umarchonov S., Normatov Sh. Calculation of earth dam strain under seismic impacts // International Conference on Actual Problems of Applied Mechanics, APAM 2021: proceedings. Tashkent. 2021, Art. 030008, pp. 1–7.

Дата поступления
07.09.2025

Normatov Sh.I. Aylana markazini avtomatlashtirilgan aniqlash algoritmini qo'llab, gruntli to'g'on qiyaliklari ustuvorligini minimal ustuvorlik koeffitsiyentini doiraviy-silindrik siljish sirti usuli bilan aniqlash

Annotatsiya. Maqola dumaloq silindrik sirpanish sirtlari usulidan foydalanib gruntli to'g'on qiyaliklarining ustuvorligini hisoblashga bag'ishlangan. Me'yoriy hujjatlarda tavsiflangan an'anaviy yondashuvdan farqli o'laroq, maqolada sirpanish aylanasining markazini aniqlashning muqobil usuli taklif etilgan bo'lib, bu barqarorlik zaxira koeffitsiyentini aniqroq baholash imkonini beradi. Asosiy e'tibor sirpanish yuzasida erishiladigan ustuvorlik koeffitsiyentining minimal qiymatini topishga qaratilgan. Maqolada dumaloq silindrsimon sirpanish sirtlari usulining nazariy asoslari, jumladan Kulon chegaraviy muvozanat tenglamasi ko'rib chiqilgan hamda sirpanish egri chiziqlarining eng xavfli markazlari va radiuslarini aniqlash algoritmi taklif etilgan. Qiyaliklarning turg'unligini avtomatlashtirilgan hisoblash uchun dastur ishlab chiqilgan bo'lib, u qiyaliklarning turli geometrik parametrlarini va grunt massivining bir jinsli emasligini hisobga olish imkonini beradi. Dastur dastlabki ma'lumotlarning bir nechta variantlarida, jumladan tuproqning turli xil bog'lanish qiymatlarida va ichki ishqalanish burchagida sinovdan o'tkazildi. Hisoblash natijalari shuni ko'rsatdiki, gruntning yopishqoqligi va ichki ishqalanish burchagining kamayishi ustuvorlik koeffitsiyentining pasayishiga olib keladi.

Kalit so'zlar: qiyaliklar ustuvorligi, gruntli to'g'onlar, doiraviy-silindrik siljish sirti usuli, ustuvorlikning zaxira koeffitsiyenti, Kulon qonuni, avtomatlashtirilgan hisoblash, gruntning tishlashishi, ichki ishqalanish burchagi.

Normatov Sh.I. Determination of the minimum coefficient of stability of earth dam slopes by the method of circular-cylindrical sliding surface using an automated algorithm for finding the center of the circle

Abstract. This article is devoted to calculating the slope stability of earth dams using the method of circular cylindrical sliding surface. In contrast to the traditional approach described in regulatory documents, this article proposes an alternative method for determining the center of the sliding circle, allowing for a more accurate assessment of the stability factor. The focus is on finding the minimum value of the stability factor achieved on the sliding surface. The article examines the theoretical foundations of the circular cylindrical sliding surface method, including the Coulomb limit equilibrium equation, and proposes an algorithm for determining the most hazardous centers and radii of sliding curves. A program for automated slope stability calculations has been developed that takes into account various slope geometric parameters and soil mass heterogeneity. The program was tested on several initial data options, including different values of soil cohesion and the angle of internal friction. The calculation results showed that a decrease in soil cohesion and the angle of internal friction leads to a decrease in the stability factor.

Keywords: slope stability, earth dams, circular cylindrical sliding surface method, safety factor, Coulomb equation, automated calculation, soil cohesion, angle of internal friction.

СОДЕРЖАНИЕ

К.С.Султанов, М.М.Мирсаидов, А.Нуьмонов, З.Уразмухамедова. Напряженное состояние Кызылсайской грунтовой плиты под действием статических нагрузок	3
М.К.Усаров, Д.К.Шамсиев, Ф.А.Усанов. Продольные колебания многоэтажного здания с пространственным фундаментом на основе континуальной пластинчатой пространственной модели	11
З.Сирожидинов, Х.А.Гуломова. Вероятностно-статистический анализ результатов испытаний прочности бетона.....	21
К.Мамасолиев, Э.А.Исмоилов. Математическое моделирование продольно-радиальных колебаний трансверсально-изотропных цилиндрических оболочек, нестационарно взаимодействующих с внутренней вязкой жидкостью.....	30
Ш.И.Норматов. Определение минимального коэффициента устойчивости откосов грунтовых плотин методом кругло-цилиндрической поверхности скольжения с применением автоматизированного алгоритма нахождения центра окружности.....	38
А.Э.Кудратов. Устойчивость упругого стержня с гасителями колебаний при поперечных колебаниях.....	47
Ф.А.Усанов. Оценка напряженно-деформированного состояния пластины под действием касательных нагрузок на основе бимоментной теории.....	54
Б.Х.Хужаёров, Ж.Р.Туйгунов. Задача аномальной фильтрации жидкости в кусочно-неоднородной пористой среде.....	60
С.Худайкулов, Ж.Каниев, А.Абдувахобов. многофазные волны при взаимодействии дисперсных смесей с турбулентными потоками и их применение.....	71
М.Е.Мадалиев. Численный анализ 3d крыла Onera M6 на основе моделей турбулентности SA и SST.....	76
Д.С. Яхшибаев. Динамика перемешивания стратифицированных потоков туямуянского водохранилища.....	82
Т.Р.Пулатов, Ж.А.Умрзоков. Математическое моделирование движения жидкости в гидроаккумуляторе гидрорекуперационной тормозной системы.....	86
Г.А.Юсупходжаева, Д.С.Бекчанова. Технология по производству смесовой пряжи из вторичных отходов натурального шелка.....	91
Ш.Т.Равутов. Обоснование параметров зубчатого привода хлопкоуборочного аппарата, оснащенного малогабаритными эллиптическими барабанами	96
О.С. Норкузиев. Расчетный анализ процесса съема хлопка со шпинделей хлопкоуборочных машин.....	103
Л.Э.Турсунбоев. Определение сил реакции опор прижимного устройства шлифовальной машины.....	110
Абдукаримов А., Рахмонов Х.Н. Синтез комбинированных зубчато-рычажных дифференциальных передаточных механизмов.....	117
Д.М.Мухаммадиев, Х.А.Ахмедов, Б.Х.Примов, О.Х.Абзоиров. Экспериментальное исследование привода пильного волоконотделителя с семяотводящим устройством.....	130

MUNDARIJA

K.S.Sultanov, M.M.Mirsaidov, A.Nu'monov, Z.Urazmuhamedova. Qizilsoy gruntli to'g'onining statik kuchlar ta'sirida kuchlanishini baholash.....	3
M.K.Usarov, F.A.Usanov, D.K.Shamsiyev. Kontinual plastinali fazoviy model asosida fazoviy poydevorga ega ko'p qavatli binoning bo'ylama tebranishlari	11
Z.Sirojiddinov, X.A.Gulomova. Beton mustahkamligi sinovlari natijalarining ehtimollik-statistik tahlili.....	21
K.Mamasoliyev, E.A.Ismoilov. Ichki qovushoq suyuqlik bilan o'zaro nostatsionar ta'sirlashuvchi transversal-izotrop silindrik qobiqning bo'ylama-radial tebranishlarini matematik modellashtirish	30
Sh.I. Normatov. Aylana markazini avtomatlashtirilgan aniqlash algoritmini qo'llab, gruntli to'g'on qiyaliklari ustuvorligini minimal ustuvorlik koeffitsiyentini doiraviy-silindrik siljish sirti usuli bilan aniqlash	38
A.E. Kudratov. Dinamik so'ndirgichlar o'rnatilgan elastik sterjenning ko'ndalang tebranishlari ustuvorligi.....	47
F.A. Usanov. Bimoment nazariyasi asosida urinma yuklar ta'siridagi plastinaning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini baholash.....	54
B.Xujayorov, J.R.Tuyg'unov. Bo'lakli bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitda suyuqliklarning anomal sizish masalasi.....	60
S.Xudayqulov, J.Kaniev, A.Abdurahobov. Dispers aralashmalar turbulent oqimlar bilan o'zaro ta'sirlashganda ko'p fazali to'lqinlar va ularning qo'llanilishi.....	71
M.E. Madaliyev. SA va SST turbulent modeli asosida Onera M6 3D qanotining sonli tahlili	76
D.S. Yaxshiboyev Tuyamuyun suv omboridagi qatlamli oqimlar dinamika aralashishi.....	82
J.A.Umrzoqov, T.R. Pulatov. Hidroreperativ tormoz tizimidagi gidroakkumulyator ichidagi suyuqlik harakatini matematik modellashtirish	86
G.A.Yusupxodjayeva, D.S.Bekchanova. Tabiiy ipakning ikkilamchi chiqindilaridan aralash yigirilgan ip ishlab chiqarish texnologiyasi	91
Sh.T. Ravutov. Kichik gabaritli elliptik barabanlar bilan jihozlangan paxta terish apparati tishli yuritmasi parametrlarini asoslash ...	96
O.S.Norqo'ziyev. Paxta terim mashinalarining shpindel yuzasidagi paxta o'ramidan tozalash jarayonining hisobiy tahlili.....	103
L.E. Tursunboyev. Jilvirlash mashinasi uzatuvchi qurilmasining tayanchlaridagi reaksiya kuchlarini tadqiq qilish.....	110
A.Abdukarimov, X.N. Raxmonov. Kombinatsiyalangan tishli-richagli differensial uzatish mexanizmlarini sintez qilish.....	117
D.M.Muhammadiyev, H.A.Axmedov, B.X.Primov, O.X. Abzoirov. Chigiti chiqaruvchi qurilmali arrali tola ajratgich harakat uzatish tizimining eksperimental tadqiqoti.....	130