



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ БЕРЕГОВОГО УКРЕПЛЕНИЯ В ПЕРИОД ПОЛОВОДЬЯ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

К. В. Гарголина

А. Е. Качаев

Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения
«Радуга», г. Коломна

Аннотация

Исследование посвящено прогнозированию устойчивости берегового укрепления малой реки в период весеннего половодья на примере Комплекса берегозащитных сооружений в г. Пошехонье Ярославской области, эксплуатирующегося с 1957 года. В ходе эксплуатации наблюдаются деградация железобетонных плит и размыв основания, что снижает несущую способность сооружения и создаёт риск аварийных ситуаций. Для оценки устойчивости авторы применяют метод математического планирования эксперимента (полный факторный план второго порядка 3^3), позволяющий построить регрессионные модели и оценить совместное влияние трёх ключевых факторов: уклона откоса, подъёма уровня воды и угла внутреннего трения грунта. В качестве функций отклика выбраны коэффициент устойчивости и максимальное смещение откоса. Получены полиномиальные модели второго порядка, выполнена оценка значимости факторов и построены поверхности отклика. Установлено, что наиболее выраженное влияние на смещение оказывает уклон откоса, а на коэффициент устойчивости — угол внутреннего трения. Повышение уровня воды снижает устойчивость во всех рассматриваемых сочетаниях. Выявлены критические сочетания параметров, соответствующие переходу сооружения в предельное состояние, что позволяет использовать полученные зависимости для обоснования реконструкции и повышения надёжности берегоукреплений в период половодья.

Ключевые слова

Береговое укрепление, устойчивость откоса, половодье, математическое планирование эксперимента, коэффициент устойчивости, деградация сооружения, гидротехническое сооружение.

Дата поступления в редакцию

24.08.2026

Дата принятия к печати

09.09.2026

Введение

Береговые укрепления малых рек, расположенные в малых городах нашей страны, являются критически важными элементами инженерной защиты населенных пунктов и инфраструктуры от разрушительного воздействия водных потоков и волновой эрозии в период половодья [1]. Обеспечение их надежности и безопасности в период весеннего половодья представляет собой сложную инженерную

задачу, особенно для сооружений с длительным сроком эксплуатации (более 25 лет). Как показывает практика, гидродинамические и волновые (геомеханическое) воздействия в период паводка являются наиболее вероятными сценариями, приводящими к аварийным ситуациям [2, 3]. В исследовании прогнозируется состояние Комплекса берегозащитных сооружений рек Согожа и Пертомка г. Пошехонье Ярославской области (рис. 1).



Рис. 1. Ситуационный план расположения Комплекса берегоукреплений по р. Согожа и Пертомка (1 — западная часть; 2 — центральная часть; 3 — южная часть)

В ходе эксплуатации данного сооружения, построенного в 1957 году, наблюдаются деградиционные процессы железобетонных плит и размыв основания, что снижает его устойчивость и несущую способность грунтового основания (рис. 2). На рис. 2а показана системная деградация участка берегоукрепления на реке Пертомка (правый берег, 2 — центральная часть). Участок с удовлетворительным железобетонным откосом показан на рис. 2б (правый берег реки Согожа, 1 — западная часть).



Рис. 2. Комплекс берегоукреплений на реках Согожа и Пертомка, г. Пошехонье, Ярославская область: а) — аварийно-опасный участок; б) — участок удовлетворительного состояния

В период половодья в устье реки Пертомка и в акватории реки Согожи наблюдается резкое повышение уровня воды (до отметок 103,5 м БС и выше, в зависимости от регулирования уровня воды в Рыбинском водохранилище), что создает критическую нагрузку на откосы сооружения [4, 5].

Процесс потери устойчивости в таких условиях имеет комплексную природу: прежде всего, он инициируется повышением уровня воды, что увеличивает гидродинамическое давление и фильтрационные потоки в теле откоса [6]. Это, в свою очередь, вызывает размыв грунта в зоне уреза воды, образование пустот под защитными плитами, а после чего потерю возможности опирания плит, что завершается их смещением в сторону водной акватории с постепенным разрушением укрепления (рис. 3).

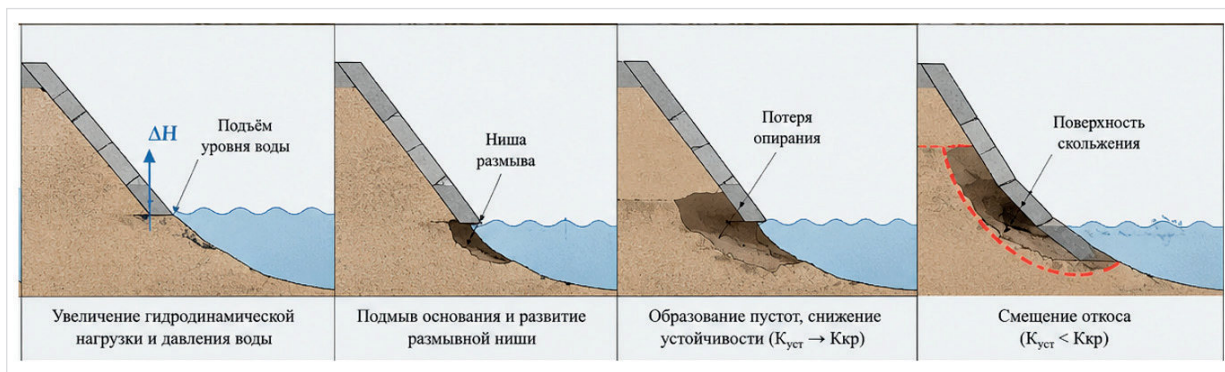


Рис. 3. Физическая модель разрушения берегоукрепления в период половодья

Традиционный подход к оценке устойчивости, основанный на детерминированных расчетах для конкретного набора параметров, не позволяет в полной мере оценить влияние множества одновременно действующих факторов и их взаимодействие [7]. В связи с этим, для повышения надежности прогнозов и обоснования проектных решений для реконструкции сооружений подобного типа представляется перспективным использование методов математического планирования эксперимента (МПЭ). Данный подход позволяет построить математическую модель процесса, оценить влияние ключевых факторов (например, уклон откоса, уровень воды, прочностные свойства грунта) на показатели устойчивости и выявить наиболее опасные сочетания параметров [8, 9].

Целью исследования является разработка и апробация методики прогнозирования устойчивости берегового откоса берегозащитного сооружения IV класса опасности, укрепленного железобетонными плитами, в период половодья на основе математического планирования эксперимента. В рамках исследования необходимо построить математические модели, описывающие зависимости коэффициента запаса устойчивости ($Y_1 = K_{уст}$) и величины максимального смещения откоса ($Y_2 = S_{max}$, м) от ключевых варьируемых факторов: уклона откоса m (X_1), величины подъема уровня воды ΔH (X_2) и угла внутреннего трения φ грунта основания (X_3).

Научная новизна в работе представлена определенными критическими сочетаниями геометрических, гидрологических и прочностных параметров, соответствующие переходу берегового откоса из устойчивого состояния в состояние предельного равновесия.

Методы исследования

В качестве основного метода исследования используется метод математического планирования эксперимента (полное факторное планирование второго порядка 33). Этот метод позволяет получить адекватную математическую модель в виде полинома второй степени, учитывающую не только линей-

ные эффекты и квадратичные члены, но и парные взаимодействия факторов. Адекватность модели проверялась по критерию Фишера, а значимость коэффициентов — по критерию Стьюдента [10, 11].

В последнее время методы математического планирования эксперимента редко используются в научной практике оценки возможных аварий на различных гидротехнических сооружениях [12, 13]. Поэтому использование этого метода в прогнозировании состояния берегового откоса при половодье весьма актуально.

Исследование направлено на разработку расчетной зависимости для прогнозирования устойчивости берегоукрепленного откоса рассматриваемого Комплекса берегоукреплений в период весеннего половодья при совместном воздействии повышенного уровня воды, гидродинамических нагрузок и изменения условий опирания берегозащитной конструкции на свое основание.

Основная часть

В качестве объекта исследования рассматривается грунтовый откос, укрепленный железобетонными плитами. Согласно исходным данным, рассматриваемая конструкция имеет уклон откоса порядка 1:2,5, а железобетонная плита свободно уложена на поверхности откоса. Нижняя часть плиты опирается на каменную наброску, выполняющую функцию упора. При нормальном эксплуатационном уровне воды 101,8 – 102,0 м БС конструкция находится в устойчивом состоянии.

В период половодья уровень воды повышается до отметки 103,50 м БС. Таким образом, для расчетного случая максимальный рассматриваемый подъем уровня относительно нормального эксплуатационного состояния составляет порядка 1,5 м. Повышение уровня воды сопровождается перемещением зоны уреза вверх по откосу и возникновением комплекса дополнительных воздействий: волнового воздействия, течения, гидродинамического давления и фильтрационных потоков в теле откоса. Физическая модель исследуемого процесса представлена на *рис. 2*.

При уровне воды 101,8 – 102,0 м БС откос и железобетонная плита находятся в устойчивом состоянии. При нормальном уровне воды площадь контакта конструкции с грунтовым основанием обеспечивает передачу собственного веса и внешних воздействий на грунтовый массив и каменную наброску.

При повышении уровня воды в результате изменяется положение уреза воды, увеличивается гидростатическое и гидродинамическое воздействие на прибрежную часть откоса. Одновременно возрастает воздействие потока и волн на грунт в зоне контакта с водой.

При рассмотрении длительного периода половодья, когда вода, например, несколько суток воздействует на берегоукрепление, усиливается размыв основания сооружения. При выполнении работ по расчету вероятного вреда для Администрации Пошехонского муниципального округа (собственных берегоукреплений), установлено, что наиболее интенсивный размыв происходит непосредственно в зоне «нового» уреза воды (в период половодья). Волновое воздействие способствует вымыванию (суффозии) мелких частиц грунта из-под нижней части железобетонной плиты, вследствие чего формируется размывная ниша.

Дальнейшее увеличение зоны размыва приводит к уменьшению площади опирания плиты. Под конструкцией формируются локальные пустоты, изменяется характер передачи нагрузки между плитой и грунтовым массивом. Одновременно снижается несущая способность основания. В физической модели данный этап соответствует переходу от непосредственного воздействия воды к формированию предпосылок потери устойчивости откоса.

В конце деградационного процесса происходит потеря части опирания железобетонных плит, потеря устойчивости откоса и смещение конструкции в сторону акватории. При дальнейшем развитии размыва площадь контакта между конструкцией и основанием уменьшается, а напряженное состояние грунтового массива изменяется. В результате формируется потенциальная поверхность скольже-

ния. В исходном отчете данный процесс описывается как просадка основания с последующим вращением плиты относительно верхней части и ее смещением вниз под действием собственного веса. При достижении критического размера зоны размыва происходит разрушение системы опирания. Железобетонная плита теряет устойчивое положение и соскальзывает в сторону русла. При этом развитие аварийного процесса определяется не одним фактором, а совместным воздействием гидродинамической нагрузки и размыва основания.

Исходными данными для планирования эксперимента послужили результаты анализа инженерно-геологических условий и конструктивных особенностей Комплекса берегоукреплений в г. Пошехонье, которые были получены в результате расчета вероятного вреда при выполнении муниципального контракта. На основе этих данных сформированы уровни варьирования факторов для прогнозирования состояния сооружения, приведенные в **табл. 1**.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Кодированное значение	Интервал варьирования	Нижний уровень (-1)	Базовый уровень (0)	Верхний уровень (+1)
Уклон откоса $(1/m)^*$	X1	0,15	0,20 (1:5)	0,30 ($\approx 1:3.3$)	0,50 (1:2)
Подъем уровня воды ΔH , м	X2	0,75	0	0,5	1,5
Угол внутреннего трения φ , град	X3	10	15	25	35

* **Примечание:** для упрощения расчетов в модели используется величина $X_1 = 1/m$ (чем круче откос, тем больше значение)

Функциями отклика на основании требований [14, 15, 16] выбраны: $Y_1 = K_{уст}$ (Коэффициент устойчивости). Рассчитывается по приближенной формуле, основанной на методе круглоцилиндрических поверхностей скольжения; $Y_2 = S_{max}$ (м) (Максимальное смещение откоса). Оценивается через эмпирическую зависимость от коэффициента устойчивости.

Математическая регрессионная модель была рассчитана и графически интерпретирована в программном комплексе Statistica 10.

Результаты

В процессе проведения настоящего исследования получены уравнения регрессии:

$$K_{уст} = 0,6869 - 0,0445 \cdot (1/m) + 0,1733 \cdot \Delta H + 0,487 \cdot \varphi - 0,6889 \cdot (1/m)^2 - 1,2667 \cdot (\Delta H)^2 - 2,05 \cdot \varphi^2 + 0,2667 \cdot (1/m) \cdot \Delta H - 0,4133 \cdot (1/m) \cdot \varphi - 0,7053 \cdot \Delta H \cdot \varphi,$$

$$S_{max} = 0,0492 + 1,1644 \cdot (1/m) + 0,1333 \cdot \Delta H - 0,2090 \cdot \varphi + 2,7778 \cdot (1/m)^2 + 0,1889 \cdot (\Delta H)^2 + 0,5002 \cdot \varphi^2 + 0,1778 \cdot (1/m) \cdot \Delta H - 0,907 \cdot (1/m) \cdot \varphi - 0,404 \cdot \Delta H \cdot \varphi.$$

При анализе уравнений регрессии было оценена значимость каждого варьируемого фактора на процесс влияния величины функций отклика (**рис. 4**).

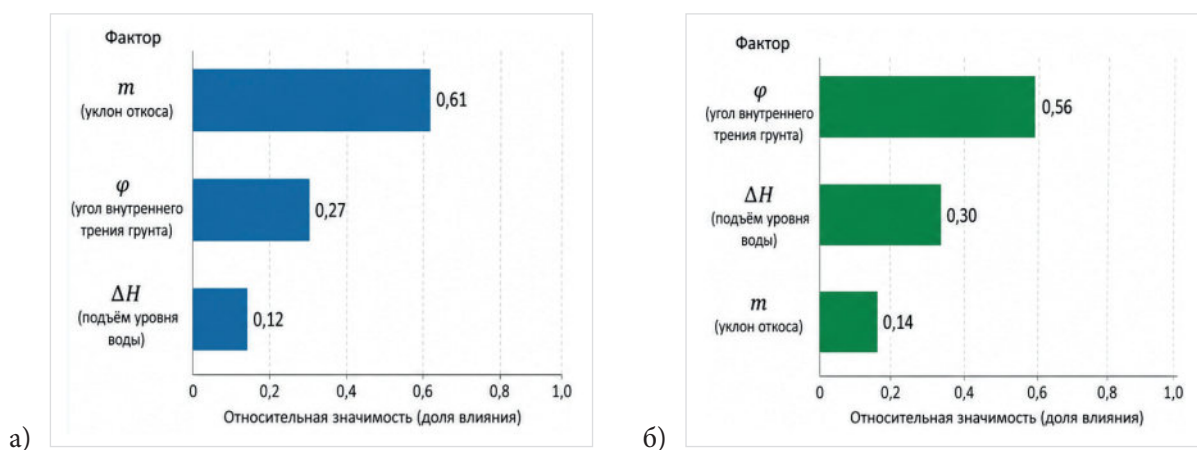


Рис. 4. Значимость варьируемых факторов для функций отклика: а) — максимальное смещение откоса S_{max} , б) — коэффициент устойчивости $K_{уст}$

На рис. 5 показана графическая зависимость $S_{max} = f(\varphi, 1/m)$. Анализ поверхности функции отклика S_{max} (рис. 5) показывает, что наиболее выраженное влияние на S_{max} оказывает уклон откоса m . При изменении m поверхность отклика изменяется наиболее заметно, а увеличение m сопровождается ростом максимального смещения.

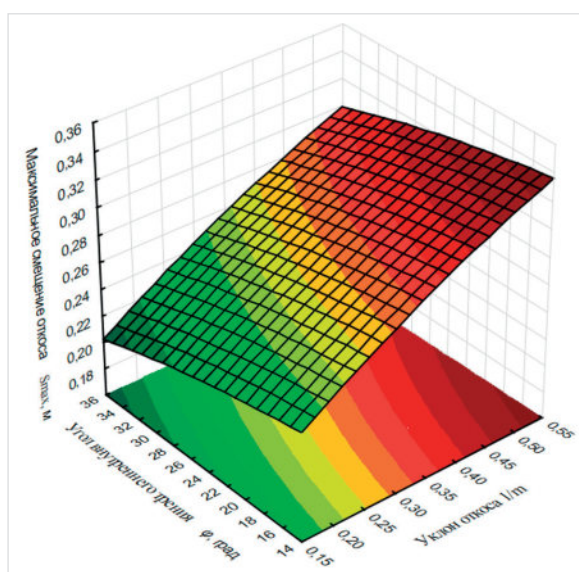


Рис. 5. График функции $S_{max} = f(\varphi, 1/m)$

При увеличении уклона откоса m величина максимального смещения возрастает. Одновременно увеличение угла внутреннего трения φ приводит к увеличению S_{max} . Поверхность имеет преимущественно восходящий характер. При сочетании больших значений m и φ достигаются максимальные значения смещения — порядка 0,34–0,36 м. Минимальные значения находятся в области малых m и φ — около 0,2 м.

Графическая зависимость $S_{max} = f(\Delta H, 1/m)$ представлена на рис. 6. Подъём уровня воды ΔH также оказывает заметное влияние на S_{max} . Однако, по представленным поверхностям его визуальное влияние выглядит менее выраженным, чем влияние m , и сопоставимым либо несколько меньшим, чем влияние φ . При этом считать ΔH малозначимым фактором нельзя, об этом свидетельствуют уравнения регрессии.

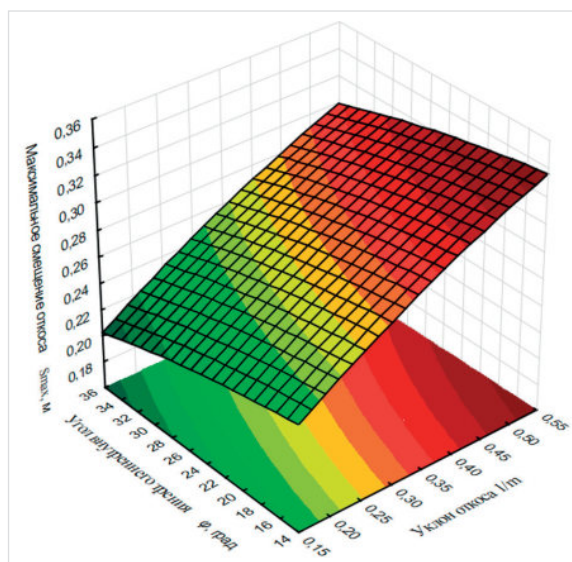


Рис. 6. График функции $S_{max} = f(\Delta H, 1/m)$

Наиболее выраженное изменение функции связано с уклоном m : при его увеличении поверхность заметно поднимается до максимальных значений S_{max} . Изменение ΔH также влияет на функцию, однако характер зависимости более умеренный, чем по m . В исследуемой области значения S_{max} находятся приблизительно в диапазоне 0,2–0,38 м.

Из графической зависимости, показанной на рис. 7 видно, что угол внутреннего трения грунта φ также оказывает существенное влияние на S_{max} . По поверхностям $S_{max} = f(1/m, \varphi)$ и $S_{max} = f(\Delta H, \varphi)$ видно, что изменение φ сопровождается заметным ростом величины функции отклика. Поэтому его влияние следует оценивать как среднее-сильное, а не как второстепенное. Здесь хорошо видна противоположная направленность влияния факторов: увеличение φ сопровождается ростом S_{max} , тогда как увеличение ΔH сопровождается снижением значения функции. Максимальные смещения располагаются в области больших φ и малых ΔH ; минимальные — при малом φ и большом подъёме уровня воды ΔH . Максимальное горизонтальное смещение откоса равно $S_{max} = 0,325$ м при значениях $\Delta H = -0,2$ м и $\varphi = 14^\circ$.

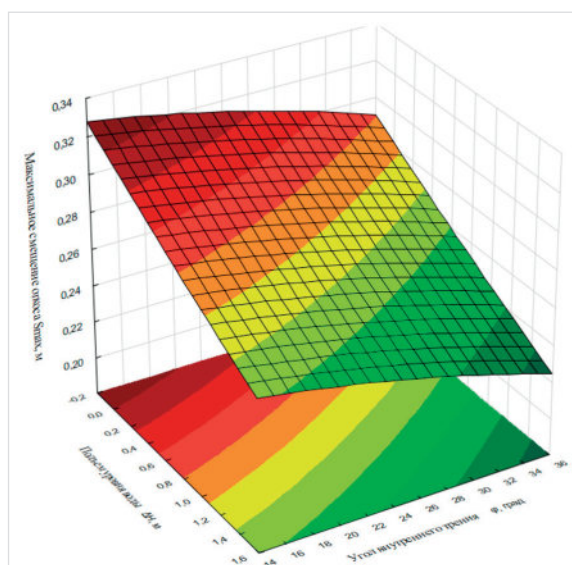


Рис. 7. График функции $S_{max} = f(\Delta H, \varphi)$

Место максимальных смещений основания берегоукрепления определяется в соответствии с **рис. 2** находится в нижней точки железобетонных плитных укреплений. Таким образом, данный метод позволяет не только получить величину смещения основания откоса, но и выявить место этого смещения при определенных показателях факторов варьирования.

На **рис. 8–10** показаны зависимости $K_{уст} = f(\varphi, 1/m)$, $K_{уст} = f(\Delta H, 1/m)$, $K_{уст} = f(\Delta H, \varphi)$, соответственно. Анализ графика на **рис. 8** показывает, что увеличение m приводит к снижению коэффициента устойчивости $K_{уст}$. Увеличение подъёма уровня воды ΔH также в целом снижает $K_{уст}$. Поверхность имеет выраженную кривизну: при определённых сочетаниях факторов наблюдается локальная область повышенных значений, но при одновременном увеличении m и ΔH коэффициент устойчивости $K_{уст}$ существенно уменьшается. Значения $K_{уст}$ находятся примерно в диапазоне 0,8 – 1,6.

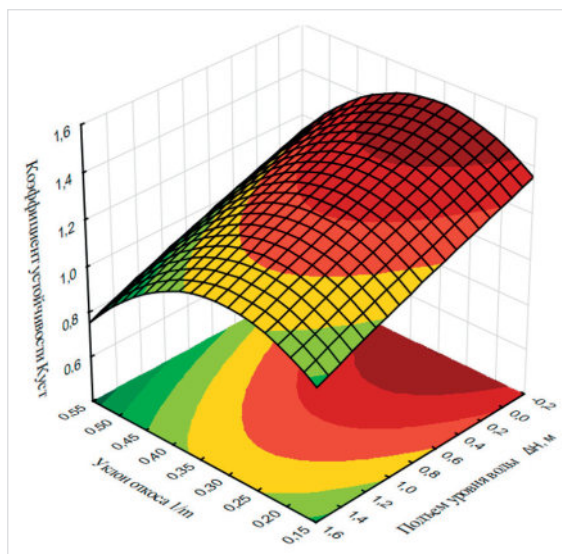


Рис. 8. График функции $K_{уст} = f(1/m, \Delta H)$

На графической зависимости (**рис. 9**) очень хорошо прослеживается увеличение коэффициента устойчивости $K_{уст}$ при росте φ .

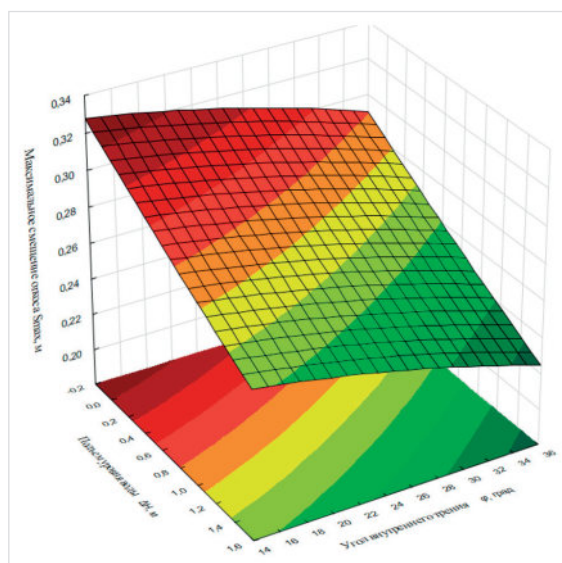


Рис. 9. График функции $K_{уст} = f(\varphi, 1/m)$

В противоположном направлении действует ΔH : при повышении уровня воды $K_{уст}$ уменьшается. Наиболее благоприятная область — большой φ и небольшой ΔH . Наиболее неблагоприятная — малый φ и большой ΔH . Зависимость выглядит преимущественно монотонной.

Поверхность отклика $K_{уст} = f(\Delta H, \varphi)$ характеризуется выраженным совместным влиянием подъёма уровня воды и угла внутреннего трения грунта (рис. 10). Увеличение ΔH сопровождается снижением коэффициента устойчивости, тогда как увеличение φ , напротив, приводит к его росту. Наиболее неблагоприятное сочетание факторов соответствует повышенному подъёму уровня воды при низких значениях угла внутреннего трения, что определяет минимальную область $K_{уст}$. Максимальные значения коэффициента устойчивости формируются при относительно небольшом ΔH и повышенных значениях φ . Нелинейный характер поверхности указывает на зависимость эффекта одного фактора от уровня другого, что подтверждает необходимость совместного учёта гидрологических и прочностных характеристик при прогнозировании устойчивости берегового откоса.

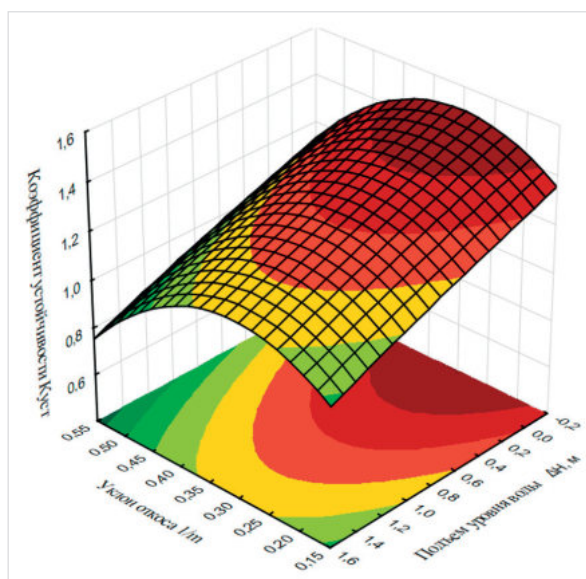


Рис. 10. График функции $K_{уст} = f(\varphi, \Delta H)$.

Анализ поверхностей отклика показывает, что все три варьируемых фактора — t , ΔH и φ — оказывают заметное влияние на функции отклика S_{max} и $K_{уст}$. Для S_{max} наиболее выраженное влияние визуально оказывает уклон откоса t , при этом φ и ΔH также существенно изменяют величину максимального смещения. Для $K_{уст}$ наиболее выражено влияние угла внутреннего трения φ , а увеличение подъёма уровня воды ΔH приводит к заметному снижению устойчивости. Наиболее неблагоприятное сочетание параметров характеризуется повышенным ΔH , низким φ и увеличенным t , что соответствует снижению устойчивости берегового откоса и росту опасности его смещения.

Заключение

Установлено, что применение метода математического планирования эксперимента позволяет оценивать устойчивость берегового откоса в период половодья с учётом совместного воздействия геометрических, гидрологических и прочностных факторов. Выявлено, что все рассматриваемые варьируемые факторы — уклон откоса t , подъём уровня воды ΔH и угол внутреннего трения грунта φ — оказывают заметное влияние на функции отклика S_{max} , $K_{уст}$.

Показано, что для максимального смещения откоса S_{max} наиболее выраженное влияние оказывает уклон откоса m , при увеличении которого величина смещения возрастает. Установлено, что изменение угла внутреннего трения φ также сопровождается заметным изменением S_{max} , а подъём уровня воды ΔH оказывает существенное, но визуально менее выраженное влияние на величину максимального смещения. Выявлено, что коэффициент устойчивости $K_{уст}$ для рассматриваемого сооружения наиболее чувствителен к изменению угла внутреннего трения φ , при увеличении которого устойчивость откоса повышается.

Установлено, что увеличение подъёма уровня воды ΔH приводит к снижению $K_{уст}$, причём наиболее неблагоприятные условия формируются при сочетании повышенного ΔH и низких значений φ .

Получено, что поверхности отклика имеют нелинейный характер, а характер изменения функции определяется совместным воздействием рассматриваемых факторов, что подтверждает целесообразность использования полиномиальных моделей второго порядка.

Разработана расчётная основа для прогнозирования состояния берегоукреплённого откоса, позволяющая оценивать коэффициент устойчивости и максимальное смещение при различных сочетаниях уклона откоса, подъёма уровня воды и прочностных характеристик грунта.

Выявлены наиболее неблагоприятные сочетания параметров, соответствующие снижению устойчивости и увеличению опасности смещения берегового укрепления, что позволяет использовать полученные зависимости для прогнозирования состояния сооружения и обоснования мероприятий по его реконструкции и обеспечению надёжности в период половодья.

Исследования проведены в рамках государственного задания Министерства сельского хозяйства Российской Федерации (тема № 102503-2600073-9-4.1.1-4.1.1).

Библиографический список

1. Ахметов Е. М., Асемов К. М., Жуматаева М. О. Исследование аварий на гидротехнических сооружениях и методы контроля их безопасности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 4. С. 70–82.
2. Качаев А. Е. Совершенствование методики оценки максимального вреда при авариях гидротехнических сооружений // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2026. № 54. С. 87–91. DOI: 10.26160/2474-5901-2026-54-87-91.
3. Качаев А. Е., Турапин С. С. Особенности реконструкции земляных плотин мелиоративных систем // Наука и мир. 2024. № 3. С. 6–10. DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.
4. Федотова О. А. Анализ и оценка гидрометеорологических условий бассейна Верхней Волги в условиях потепления климата // Природообустройство. 2013. № 5. С. 59–63.
5. Новикова Т. С., Булякова И. А. Применение фрактальной геометрии в исследовании речных систем // Системный анализ в науке и образовании. — 2024. — № 2. — С. 9–20.
6. Качаев А. Е., Турапин С. С. Особенности оценки технического состояния однородной грунтовой плотины по данным инженерных изысканий и математического планирования эксперимента // Системные технологии. 2026. № 1 (58). С. 128–137. DOI: 10.55287/22275398_2026_58_128.
7. Качаев А. Е., Сорока В. В., Хитров Я. И. Анализ результатов численного моделирования устойчивости откоса гидротехнического сооружения с подпорной стенкой SRM и SAM методами // Системные технологии. 2025. № 3 (56). С. 20–31. DOI: 10.48612/dnitii/2025_56_20-31.

8. Меннанов Э. М., Родин С. В., Калафатов Д. А., Богоуцкий Ю. Г. Планирование эксперимента при исследовании силового взаимодействия фундаментов с грунтовым основанием // Строительство и техногенная безопасность. 2024. № 34 (86). С. 31 – 37.
9. Дьяков И. М., Дьяков М. И., Барыкин Б. Ю. Планирование экспериментальных исследований работы системы «фундамент-основание» при внезапных догружениях // Строительство и техногенная безопасность. 2020. № 19 (71). С. 5 – 12.
10. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: монография. — 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, 1976. 280 с.: ил.
11. Montgomery D. C. Design and analysis of experiments: textbook. — 9th ed. — New York: John Wiley & Sons, 2017. 640 p.
12. Шакирова А. И. Системы мониторинга технического состояния и предупреждения аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях с использованием волоконно-оптических средств инструментального контроля: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Шакирова Алсу Ильнуровна. — Казань, 2020. 24 с.
13. Качаев А. Е., Турапин С. С. Обоснование необходимости разработки комплексных расчетных моделей грунтовых плотин мелиоративных систем // Наука и мир. 2024. № 3. С. 1 – 5. DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-1-5.
14. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003: свод правил: утв. Приказом Минстроя России от 16.12.2019 № 811/пр: введ. 17.06.2020. М.: Стандартинформ, 2020. 44 с.
15. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003: свод правил: утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012 № 274: введ. 01.01.2013. М.: Минрегион России, 2012. 71 с.
16. Мозголов М. В., Костюков В. В. О сходимости решений моделей вычислительного комплекса SCAD из трехгранной призмы первого порядка. Часть 2. Н-метод // Системные технологии. 2024. № 1 (50). С. 5 – 19. DOI: 10.48612/dniti/2024_50_5-19.

FORECASTING THE STABILITY OF COASTAL FORTIFICATIONS DURING THE HIGH WATER PERIOD BY THE METHOD OF MATHEMATICAL PLANNING OF THE EXPERIMENT

K. V. Gargolina

A. E. Kachaev

All-Russian scientific research institute of irrigation and agricultural supply systems “Raduga”,
Kolomna

Abstract

The article is devoted to predicting the stability of a small river bank protection structure during the spring high-water period, using the example of the bank protection complex in the town of Poshekhonye, Yaroslavl Region, which has been in operation since 1957. During its operation, degradation of reinforced concrete slabs and foundation erosion have been observed, reducing the bearing capacity of the structure and creating a risk of emergencies. To assess stability, the authors apply the method of mathematical experimental design (full factorial design of the second order 3^3), which allows constructing regression models and evaluating the combined effect of three key factors: slope steepness, water level rise, and the angle of internal friction of the soil. The response functions selected are the safety factor and the maximum slope displacement. Polynomial models of the second order are obtained, the significance of the factors is assessed, and response surfaces are plotted. It has been established that slope steepness has the most pronounced effect on displacement, while the safety factor is most influenced by the angle of internal friction. An increase in the water level reduces stability in all considered combinations. Critical combinations of parameters corresponding to the transition of the structure to a limit state have been identified, which makes it possible to use the obtained dependencies to substantiate reconstruction and improve the reliability of bank protection during the high-water period.

The Keywords

Bank protection, slope stability, high-water period, mathematical experimental design, safety factor, structural degradation, hydraulic structure.

Date of receipt in edition

24.08.2026

Date of acceptance for printing

09.09.2026

Ссылка для цитирования:

К. В. Гарголина, А. Е. Качаев. Прогнозирование устойчивости берегового укрепления в период половодья методом математического планирования эксперимента. — Системные технологии. — 2026. — № 3 (60). — С. 74–85.