

УДК 624.046.5

ВЕРОЯТНОСТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПО ЗАДАННОМУ УРОВНЮ НАДЕЖНОСТИ

Ю. В. Краснощеков¹, М. Ю. Заполева²

¹ФГБОУ ВПО «СибАДИ» Россия, г. Омск;

²ОАО СМУ №175 «Радиострой».

Аннотация. В статье обосновывается идея о том, что в настоящее время существует достаточно данных для вероятностного проектирования конструкций по заданному уровню надежности. Основное внимание авторы акцентируют на связь уровня надежности с заданной вероятностью коэффициента запаса. Дается сравнение коэффициентов запаса в разных методах расчета. Предлагается расчетная модель случайного коэффициента запаса, распределенного по нормальному закону. Приведен пример расчета железобетонной плиты покрытия на задаваемую надежность.

Ключевые слова: надежность, методы расчета, строительные конструкции, коэффициент запаса, безопасность.

Введение

Надежность - основной критерий качества конструктивных элементов и систем в целом. Введение в нормативные документы понятия надёжности не только обеспечило единый критерий проектирования конструкций, но и определило вектор совершенствования методов расчёта, направленный на повышение гарантии безопасности. В настоящее время надежность конструкций при проектировании обеспечивается расчетом полувероятностным методом предельных состояний [1].

По вопросу развития методов расчета существуют две точки зрения. С одной стороны, полувероятностный подход позволяет не только гарантировать безопасность и эксплуатационную пригодность конструкции, но и допускает при необходимости совершенствование норм проектирования путем уточнения и дифференциации коэффициентов надёжности. С другой стороны, поскольку метод предельных состояний основан на полувероятностном подходе, а теория надёжности значительно продвинулась вперёд, поэтому для решения задачи надёжности целесообразно перейти к принципиально новой методике проектирования.

Действительно, в существующем виде детерминированный метод предельных состояний не даёт чёткого ответа о надёжности конструкций, не позволяет проектировать их с заданным уровнем надёжности и оценить качество проектного решения по этому критерию. Недостатком этого метода является также то, что он оперирует расчетными (определенными) параметрами, в то время как

они зачастую являются случайными величинами с разными характеристиками изменчивости, сопоставлять которые, например, в статических условиях равновесия можно только с определенной степенью приближения.

Дальнейшее совершенствование расчётных методов требует широкого привлечения методов теории вероятностей и надёжности, особенно при необходимости учёта фактора времени. Поэтому действующими нормами допускается также производить расчет по заданному значению надёжности вероятностными методами при наличии достаточных данных об изменчивости основных факторов, входящих в расчетные зависимости. Разработка таких методов - актуальная задача.

Коэффициент запаса (безопасности) в разных методах расчета

Изначально надежность оценивали по величине коэффициента запаса. Коэффициенты запаса присутствовали практически во всех известных методах расчёта на прочность, однако соотношение значений коэффициентов и уровня надёжности не всегда было одинаковым. Это обусловлено тем, что по мере развития методов расчёта всё большее внимание уделялось учёту изменчивости исходных данных с использованием элементов теории вероятностей.

Например, в классическом методе расчета по допускаемым напряжениям коэффициент запаса принимали в виде отношения средних значений несущей способности R к нагрузочному эффекту Q

$$\bar{k} = \bar{R}/\bar{Q} . \quad (1)$$

Детерминированную величину (1) отношения математических ожиданий прочности и нагрузки называют статистическим или общим коэффициентом запаса, не являющимся случайной величиной [2]. В сущности, оценить надёжность конструкции только по величине общего коэффициента запаса \bar{k} без учёта вероятностной природы нагрузок и прочностных свойств материалов невозможно. Поэтому значимостью этого параметра длительное время пренебрегали.

Единый коэффициент запаса использовали и в методе расчёта по разрушающим (предельным) нагрузкам. По мнению В. Д. Райзера, коэффициент запаса в этом методе является, в сущности, функцией нормативных значений нагрузки и несущей способности [3]:

$$k_n = R_n/\sigma_n . \quad (2)$$

Детерминированную величину k_n В. В. Болотин назвал условным коэффициентом запаса, не являющимся случайной величиной, а выражение (2) – «классическим условием прочности» [4].

В методе расчёта конструкций по предельному состоянию, несмотря на вероятностную сущность дифференцированных коэффициентов надёжности, также часто обращаются к расчетному коэффициенту запаса в виде отношения расчетных значений несущей способности к нагрузочному эффекту, как к основному мерилу надёжности

$$k = R/Q . \quad (3)$$

Как уже отмечалось, определение «расчетный» по отношению к уровню надёжности весьма условно и неоднозначно. Поэтому существует вероятностная трактовка коэффициента запаса (безопасности) в виде случайной величины [5]

$$\tilde{k} = \tilde{R}/\tilde{Q} . \quad (4)$$

Если известна плотность распределения $p(k)$, то вероятность наступления состояния, обусловленного равенством (4) и названного предельным, определяется по формуле

$$P_Q = \int_0^1 p(k) dk . \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) представляют собой основу простейшей вероятностной модели

расчёта конструкций. Применительно к задачам прочности А. Р. Ржаницын назвал величину $P_Q(k < 1)$ вероятностью разрушения, удобную для вероятностных расчётов, когда нагрузка и прочность подчиняются несимметричным законам распределения, отличающимся от нормального закона [2].

В свое время после появления различных решений случайной функции (4) пришли к выводу, что единый коэффициент запаса, учитывающий одновременно изменчивость нагрузок и свойств материалов, а также точность расчётных схем и многообразные условия работы, не мог быть объективным критерием надёжности конструкций. Поэтому от идеи вероятностного коэффициента запаса пришлось отказаться и перейти к более совершенному методу предельных состояний с частными коэффициентами надёжности. Тем не менее, нельзя отрицать практического значения коэффициента запаса в реальном проектировании, так как это наиболее простой и доступный вид оценки эффективности конструктивного решения. По численным значениям коэффициента часто судят об уровне надёжности конструкций, необходимость обеспечения которого является одним из основных требований к методам расчёта. Даже, если физический смысл коэффициентов запаса скрыт от проектировщика, он обычно воспринимается как обобщённое отражение мер предосторожности. Подкупающая простота вычисления коэффициента запаса способствует решению проблемы оперативного контроля результатов расчета и наглядности расчётной процедуры.

Особенности вероятностного метода двух моментов

Коэффициент запаса фигурирует и в наиболее доступном вероятностном методе двух моментов с приближённой оценкой надёжности посредством характеристики безопасности β . Этот метод относят к более высокому уровню обеспечения безопасности, по сравнению с полувероятностным методом предельных состояний.

Характеристика безопасности определяется по формуле

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{s_R^2 + s_Q^2}} = \frac{\bar{k} - 1}{\sqrt{\bar{k}^2 v_R^2 + v_Q^2}} , \quad (6)$$

где s_R , s_Q – среднеквадратические (стандартные) отклонения несущей способности и нагрузочного эффекта.

Метод двух моментов основан на предположении распределения исходных данных по нормальному закону.

При нормировании коэффициентов надежности метода предельных состояний также часто используют нормальный закон распределения случайных величин R и Q . Так, для случайной величины R реализуется достаточно простое выражение

$$R_n = \bar{R}(1 - \mu_R v_R), \quad (7)$$

а для случайной величины Q

$$Q_n = \bar{Q}(1 + \mu_Q v_Q), \quad (8)$$

где μ_R и μ_Q – характеристики обеспеченности нормативных значений несущей способности R_n и нагрузочного эффекта Q_n ; \bar{R} и \bar{Q} , v_R и v_Q – средние значения и коэффициенты вариации случайных величин R и Q .

При других законах распределения случайных величин имеется возможность заменить их нормальными с теми же математическими ожиданиями и дисперсиями,

что и у исходных данных. Этот приём имеет место при использовании метода статистической линеаризации. Возможен и другой подход, когда исходные распределения заменяются нормальными с такими математическими ожиданиями и дисперсиями, чтобы значения их плотностей распределения были равны на границе отказа в точке с наибольшей совместной плотностью вероятности. Данный способ применяется, например, в методе «горячих» точек [3]. В любом случае вероятностный метод моментов позволяет получить достаточно объективную оценку надёжности конструкции, рассчитанных по методу предельных состояний. Для расчета по заданному уровню надежности требуется нормирование характеристик безопасности β и соответствующих вероятностей безотказной работы P_R в зависимости от класса ответственности сооружения или предельных состояний. Например, в работе [6] в качестве нормативных уровней надёжности предлагаются показатели, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Задаваемая надёжность в зависимости от уровня ответственности сооружения

Уровень ответственности	Несущие конструкции		Ограждающие конструкции	
	P_R	β	P_R	β
1	0,999	3,11	0,995	2,56
2	0,995	2,56	0,990	2,32
3	0,990	2,32	0,975	1,96
Временные сооружения	0,950	1,65	0,95	1,65

По заданной характеристике безопасности β можно определить коэффициент запаса (безопасности) \bar{k} . Для этого следует решить уравнение (8) относительно \bar{k} :

$$\bar{k} = \omega \frac{1 + \sqrt{1 - (1 - \beta^2 v_R^2)(1 - \beta^2 v_Q^2)}}{1 - \beta^2 v_R^2}. \quad (9)$$

Существуют способы определения коэффициентов вариации v_R и v_Q для различных расчетных ситуаций с использованием современных норм проектирования [7].

Основной недостаток метода двух моментов заключается в том, что он не учитывает разную обеспеченность значений случайных величин R и Q . В формуле (9) этот недостаток устраняется введением условного коэффициента ω . В монографии [8] этот коэффициент предлагается принять в виде

$$\omega = 1 + \beta_{R^v R} / 1 + \beta_{Q^v Q}. \quad (10)$$

Величину коэффициента ω можно оценить также по известной зависимости коэффициента запаса и коэффициентов надежности метода предельных состояний $\gamma_n, \gamma_f, \gamma_m, \gamma_d$ с учетом формул (7) и (8)

$$\bar{k} = \gamma_n \gamma_f \gamma_m \gamma_d (1 + \mu_Q v_Q) / (1 - \mu_R v_R). \quad (11)$$

Метод моментов использовался в нормах проектирования некоторых стран, однако от этой практики постепенно отказались, отдав предпочтение методу предельных состояний [8].

По известному значению \bar{k} можно решать различные задачи. При этом нет необходимости нормировать расчетные значения исходных данных.

Вероятностный метод расчета по заданному коэффициенту запаса

Длительный опыт применения методов расчета по предельным состояниям и двух моментов показал, что вероятностной основой обобщенного коэффициента запаса может быть нормальный закон

распределения, достоинством которого является то обстоятельство, что линейные комбинации случайных величин, фигурирующие, например, в условии прочности $R \geq Q$, имеют также нормальный закон распределения. К нормальному закону стремится сумма независимых (или слабо зависимых) случайных величин, каждая из которых может быть распределена по любому другому закону.

Исходя из этого, представим произвольное (расчетное) значение коэффициента запаса k в виде, аналогичном (7)

$$k = \bar{k}(1 - \beta_k v_k), \quad (12)$$

где β_k – характеристика обеспеченности расчетного значения k .

Заметим, что выражение (12) полностью соответствует (8) при $\beta_k = \beta$, $k = 1$ и $v_k = \sqrt{\bar{k}^2 v_R^2 + v_Q^2} / \bar{k}$ и, объединяя в единую систему условия прочности (3) и (4), по существу, является результатом вероятностного подхода к методу предельных состояний.

В работе [5] получена формула для приближённой оценки коэффициента вариации случайной величины $\bar{\zeta}$, выведенная разложением функции (4) в ряд Тэйлора:

$$v_k \approx \frac{\sqrt{v_R^2 + v_Q^2}}{1 + v_Q^2}. \quad (13)$$

Инженерный расчет на заданный уровень надежности по формулам (12) и (13) может быть альтернативой моментного метода расчета. При этом можно задаваться не только характеристикой безопасности β_k , но и расчетным значением k .

Пример расчета. Определить площадь сечения A_s рабочей арматуры ребристой плиты покрытия здания в г. Ханты-Мансийск при исходных данных: нормативная (средняя) постоянная нагрузка $\bar{\alpha} = 3,285$ кН/м², расчетная постоянная нагрузка $\bar{g} = 3,821$ кН/м², снеговая нагрузка до 2003 г. $\bar{\zeta} = S_1 = 1,5$ кН/м² и в настоящее время $\bar{\zeta} = S_{25} = 3,2$ кН/м², среднее значение сопротивления сжатию бетона класса В 20 $\bar{R}_b = 19,28$ МПа (получена по формуле (7) при $R_{bn} = 15$ МПа, $\mu_R = 1,645$ и $v_R = 0,135$), расчетное сопротивление $R_b = 11,5$ МПа, среднее значение сопротивления арматуры класса А 500 $\bar{R}_s = 598$ МПа (при $R_{sn} = 500$ МПа, $\mu_R = 1,645$ и $v_R = 0,1$), расчетное сопротивление арматуры $R_s = 435$ МПа, ширина плиты $b =$

1,5 м, рабочая высота $h_0 = 0,27$ м, расчетный пролет $l_0 = 5,9$ м. При расчете по методу предельных состояний: полная расчетная нагрузка $q = 3,821 + 3,2 = 7,021$ кН/м², расчетный изгибающий момент $M = qbl_0^2/8 = 45,825$ кН·м, параметры сжатой зоны $\alpha_m = M/R_b b h_0^2 = 0,036$ и $v = (1 - 2\alpha_m)^{1/2} = 0,963$, требуемая площадь арматуры $A_s = M/v R_s h_0 = 4,05$ см². Принято по сортаменту 4Ø12 при $A_{s\phi} = 4,52$ см².

Надежность плиты проверяем по методу моментов. Коэффициент вариации постоянной нагрузки $v_g = 0,054$ принят в зависимости от коэффициентов надежности по нагрузке γ_f из условия $v_{gi} = \gamma_{fi}/3$ с учетом весовых коэффициентов $\alpha_{gi} = g/g$. Коэффициент вариации снеговой нагрузки определен из условия распределения её по двойной экспоненциальной функции (распределение Гумбеля) при $z = (S_{25} - S_1)/\ln 25 = 0,528$ кН/м² и $v_s = 1,282z/\bar{\zeta} = 0,212$. При весовых коэффициентах $\alpha_g = 3,285/(3,285 + 3,2) = 0,507$ и $\alpha_s = 3,2/(3,285 + 3,2) = 0,493$ обобщенный коэффициент вариации $v_Q = 0,132$. Так как наиболее вероятное разрушение плиты определяется текучестью арматуры, то принимается $v_R = 0,1$. При $\bar{v} = \bar{R}_s A_s / \bar{R}_b b = 0,93$ см $\bar{M}_u = \bar{R}_b b \bar{v} (h_0 - \bar{v} l_0/2) = 71,67$ кН·м и $\bar{\alpha}_u = 8 \bar{M}_u / b h_0^2 = 10,98$ кН/м. Общий коэффициент запаса $\bar{v} = \bar{\alpha}_u / (\bar{\alpha} + \bar{\zeta}) = 1,693$, характеристика безопасности по формуле (6) $\beta = 3,228$ и надежность $P_R = 0,9993$. Выполняем вероятностный расчет по заданному уровню надежности при 2 уровне ответственности здания ($\beta = 2,56$ по табл. 1). По формуле (9) при $\omega = 1$ получено $\bar{v} = 1,515$. По формуле (1) среднее значение нагрузки, на которую следует рассчитывать прочность плиты, $\bar{D} = \bar{v} \bar{Q} = 1,515(3,285 + 3,2) = 9,825$ кН/м². Изгибающий момент $\bar{M} = 64,125$ кН·м, $\alpha_m = \bar{M} / \bar{R}_b b h_0^2 = 0,033$ (изменчивость геометрических размеров не учитывается) и $v = 0,986$, требуемая площадь арматуры $A_s = \bar{M} / v \bar{R}_s h_0 = 4,03$ см².

Действительный коэффициент вариации v_R для конструкций рассматриваемого типа может быть значительно больше, чем вычисленный в примере по прочности нормальных сечений. В таблице 2 приведены результаты расчетов площади арматуры A_s в см² при разных уровнях ответственности здания и разных значениях коэффициентов вариации прочности плиты.

Таблица 2 – Требуемая площадь сечения арматуры в зависимости от уровня ответственности сооружения и изменчивости прочности плиты покрытия по вероятностному расчету

Уровень ответственности	Коэффициенты вариации v_R		
	0,1	0,12	0,14
1	4,51	4,84	5,30
2	4,03	4,32	4,60
3	3,94	4,12	4,35

Анализ показывает, что при расчете по предельным состояниям надежность проектируемой конструкции обеспечена только для зданий 2 и 3 уровней ответственности при минимальном значении v_R . Надежность в значительной степени зависит от изменчивости исходных данных. В отдельных случаях требуемая площадь сечения рабочей арматуры может быть больше на 30%, чем при расчете по предельным состояниям.

Для сравнения результатов расчета разными методами определены: коэффициент $\beta_R = (64,125 - 45,825)/0,1 \cdot 64,125 = 2,85$; $\beta_{Q1} = (3,821 - 3,285)/0,054 \cdot 3,285 = 3,02$; $\beta_{Q2} = 0$ и доля постоянной нагрузки $\alpha_g = 0,507$. По формуле (10) $\omega = (1 + 2,85 \cdot 0,1)/(1 + 0,507 \cdot 3,02 \cdot 0,054) \cdot 1 = 1,187$. По методу двух моментов уточненное значение $\bar{\nu} = 1,187 \cdot 1,515 = 1,798$. По формуле (13) при $k = 1$, $v_R = 0,1$ и $v_Q = 0,132$ получено приближенное значение коэффициента вариации $v_k = 0,163$ и по формуле (12) $\bar{\nu} = 1,716$. Расхождение с методом двух моментов менее 5%.

Заключение

1. Надежность конструкций при расчете по методу предельных состояний определяется условной обеспеченностью расчетных значений исходных данных, установленных нормами, и не зависит от их вероятной изменчивости в действительности.

2. Для расчета по заданному уровню надежности можно использовать метод двух моментов.

3. Альтернативным методом расчета по заданному уровню надежности может быть изложенный здесь более простой метод случайного коэффициента запаса.

4. Общий (средний) коэффициент запаса вероятностных методов расчета в отличие от аналогичного коэффициента классического метода расчета по допускаемым напряжениям является одним из основных показателей надежности и определяется в зависимости от изменчивости расчетных параметров.

5. Для вероятностного расчета исключается необходимость нормирования расчетных значений параметров.

6. Нормирование средних значений и характеристик изменчивости расчетных параметров следует выполнять с учетом опыта применения метода предельных состояний.

Библиографический список

- ГОСТ Р 54257-2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. – М.: Стандартинформ, 2011. – 20 с.
- Райзер, В. Д. Теория надёжности сооружений / В. Д. Райзер. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 384 с.
- Ржаницын, А. Р. Теория расчёта строительных конструкций на надёжность / А. Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
- Болотин, В. В. Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений / В. В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1981. – 351 с.
- Капур, К. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. – 608 с.
- Знаменский, Е. М. О расчете конструкций с заданным уровнем надежности / Е. М. Знаменский, Ю. Д. Сухов. – Строительная механика и расчет сооружений. – 1987. – №2. – С. 7 – 9.
- Краснощеков, Ю. В. Вероятностные основы расчета конструкций. Надежность строительных конструкций. – Palmarium academic publishing, 2014. – 234 с.
- Шпете, Г. Надежность несущих строительных конструкций / Пер. с нем. О.О.Андреева. – М.: Стройиздат, 1994. – 288 с.

PROBABILISTIC DESIGN OF A STRUCTURE BY THE GIVEN LEVEL OF RELIABILITY

Y. V. Krasnoshchekov, M. Yu. Zapoleva

Abstract. The article substantiates the idea that currently there is sufficient data for probabilistic design of structures by the given level of reliability. The article is focused on the connection of reliability's level with given probability of assurance factor. There is presented a comparison of assurance factors in different methods of calculation. The authors propose computational model of a stochastic assurance factor, distributed according to the normal law. There is given an example of calculating reinforced concrete roof plank on given reliability.

Keywords: reliability, methods of calculation, building constructions, assurance factor, safety.

References

- GOST R 54257-2010. *Nadjozhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozhenija i*

trebovanija [State standard R 54257-2010. Reliability of building structures and foundations. Basic provisions and requirements]. Moscow, Standartinform, 2011. 20 p.

2. Raizer V. D. *Teorija nadjozhnosti sooruzhenij* [Structural safety theory]. Moscow, Izd-vo ASV, 2010. 384 p.

3. Rzhanicyn A. R. *Teorija raschjota stroitel'nyh konstrukcij na nadjozhnost'* [The theory of calculating building structures for reliability]. Moscow, Strojizdat, 1978. 239 p.

4. Bolotin V. V. *Metody teorii verojatnostej i teorii nadjozhnosti v raschjotah sooruzhenij* [Methods of probability theory and reliability theory in calculating structures]. Moscow, Strojizdat, 1981. 351 p.

5. Kapur K., Lamberson L. *Nadjozhnost' i proektirovanie sistem* [Reliability and designing of systems]. Moscow, Mir, 1980. 608 p.

6. Znamenskiy E. M., Sukhov Y. D. O raschete konstrukcij s zadannym urovnem nadezhnosti [On calculation of structures with a given level of reliability]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*, 1987, no 2. pp. 7 – 9.

7. Krasnoshchekov Y. V. *Verojatnostnye osnovy rascheta konstrukcij. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij* [Probabilistic bases of calculating structures. Reliability of

building structures]. Palmarium academic publishing, 2014. 234 p.

8. Shpete, G. *Nadjozhnost' nesushhih stroitel'nyh konstrukcij* [Reliability of bearing structures]. Per. s nem. O. O. Andreeva. Moscow, Strojizdat, 1994. 288 p.

Краснощеков Юрий Васильевич (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции», ФГБОУ ВПО «СибАДИ». (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: uv1942@mail.ru).

Заполева Мария Юрьевна (Россия, г. Омск) – инженер-конструктор, ОАО СМУ №175 «Радиострой». (644082, г. Омск, ул. Энгельса, 1, e-mail: m18kras@spartak.ru).

Krasnoshchekov Yuriy Vasilievich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department "Building constructios", The Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: uv1942@mail.ru).

Zapoleva Maria Yurievna (Russian Federation, Omsk) – design engineer, ОАО СМУ No. 175 "Radiostroy". (644082, Omsk, Engels st., 1, e-mail: m18kras@spartak.ru).

УДК 625.731.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ ГЕОМАТОВ

В. А. Шнайдер¹, В. В. Сиротюк¹, Т. П. Троян¹, Е. Ю. Мосур²

¹ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск;

²ФГБОУ ВПО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского», Россия, г. Омск.

Аннотация. Целью статьи является определение коэффициентов шероховатости геоматов, применяемых для повышения устойчивости откосов земляного полотна от размыва поверхностными водами. В статье описано влияние коэффициентов шероховатости на гидравлическое сопротивление движения воды. Проанализированы расчетные формулы, на основе которых опытным путем были получены значения коэффициентов шероховатости геоматов. Описаны условия проведения эксперимента в лаборатории "Гидравлики и инженерной гидрологии" СибАДИ. Вопрос применения геоматов для повышения устойчивости откосов земляного полотна от процессов водной эрозии мало изучен и требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: откосы земляного полотна, геосинтетические материалы, геоматы, коэффициент шероховатости, гидравлическое сопротивление.

Введение

Мероприятия по защите земляного полотна от размыва поверхностными водами назначают в том случае, когда скорость течения воды превышает допустимую по размыву:

$$V > V_{доп}, \quad (1)$$

где V – фактическая скорость воды, м/с, $V_{доп}$ – допустимая скорость, м/с.

Средняя скорость при равномерном движении в открытых руслах определяется по формуле:

$$V = C \sqrt{Ri}, \quad (2)$$

где V – средняя скорость, м/с; R – гидравлический радиус, м; i – уклон дна русла, C – коэффициент Шези, м^{0,5}/с.

Для снижения скорости потока и повышения противозерозионной устойчивости откосов земляного полотна последние годы