

Разработка программного комплекса расчета устойчивости пойменных насыпей

В статье приведен аналитический метод расчета устойчивости откосов пойменных насыпей с использованием разработанного для этих целей программного комплекса. В данной программе имеется возможность подбора проектных параметров, что позволяет найти критическое место с наибольшей вероятностью обрушения. Для достижения необходимой устойчивости программа осуществляет подбор грунтов с необходимыми сдвиговыми характеристиками и изменяет конфигурацию поперечного профиля с целью оптимизации строительных работ и минимизации финансовых затрат.

Ключевые слова: пойменная насыпь, программирование расчета, устойчивость откосов, построение профиля.

В современном мире проблема рационального проектирования пойменных насыпей на подходах к искусственным сооружениям в условиях периодического воздействия паводковых вод является актуальной. Вопросы, связанные с этой проблемой, решают проектные организации.

Пойменная насыпь работает в условиях постоянного воздействия атмосферных и климатических факторов, воспринимая большие нагрузки от собственного веса и проходящих поездов. В этих условиях все элементы железнодорожного пути, в том числе земляное полотно, по прочности и устойчивости должны обеспечивать безопасное и надежное движение пассажирских и грузовых поездов с наибольшими установленными скоростями, а также иметь достаточные резервы для дальнейшего повышения скоростей движения и веса поездов.

При сооружении насыпей в поймах рек руководствуются индивидуальными проектными разработками, которые, как правило, значительно отличаются от типовых решений.

Как правило, для придания дополнительной устойчивости в нижней части насыпей устраивают присыпные бермы шириной поверху не менее 3 м, откосы делают более пологими, чем обычно, предусматривают их укрепление для защиты грунтов от размыва. Кроме того, пойменные насыпи, особенно на подходах к мостам, имеют значительную высоту.

На участках постоянного подтопления оснований и длительного стояния воды нижнюю часть насыпи возводят из дренирующих, а при высоких скоростях движения воды – из крупноблочных скальных грунтов с расчетом на фильтрацию потока через насыпь. Такие насыпи называют фильтрующими (рис. 1).

Фильтрующую часть насыпи, как и часть, отсыпанную дренирующим грунтом, выводят на 0,5 м выше горизонта высокой воды. Иногда фильтрующие насыпи применяют вместо искусственных сооружений, они пропускают воду с одной стороны железной дороги на другую.

Резервы на поймах, как правило, не закладывают, чтобы избежать усиления размывных

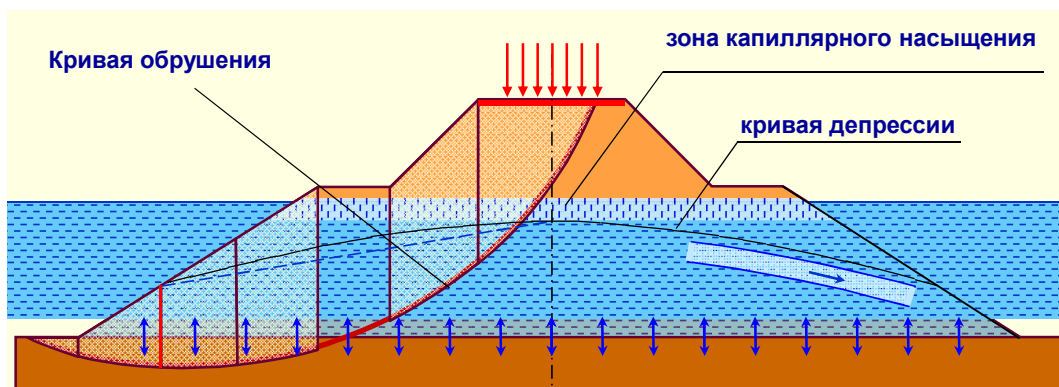


Рис. 1. Фильтрующая насыпь



Рис. 2. Отсыпка пойменной насыпи и укрепление откосов каменной наброской

процессов. При периодическом подтоплении пойменные насыпи можно возводить из обычных грунтов, кроме глин. Их отсыпают тонкими слоями (25–30 см) с тщательным уплотнением, обеспечивающим достаточную плотность и водонепроницаемость тела насыпи (рис. 2).

Особое значение при отсыпке пойменных насыпей имеет установление темпа работ и выбор соответствующего машинного оснащения с учетом сроков отсутствия воды в пойме. Целесообразно обеспечить столь высокий темп работ, чтобы возвести насыпь в период между паводками.

Если паводок прогнозируют в ходе работ, то пойменную насыпь стремятся на возможно большем протяжении вывести выше горизонта высокой воды (см. рис. 2). Это позволяет избежать затопления техники и имущества при подъеме их на возведенную насыпь, а также при подходящих условиях продолжить отсыпку дренирующим грунтом с головы насыпи. Чтобы решать подобные задачи, необходимо уметь определять, как изменяется высота насыпи в процессе отсыпки.

Весьма эффективным способом возведения пойменных насыпей является гидромеханизация [1]. При ее применении не нужно уплотнять грунт, а в случаях намыва насыпей с уложенными «пляжными» откосами — укреплять их.

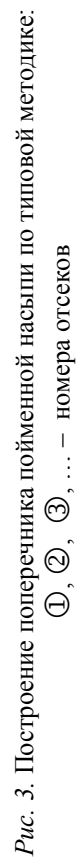
Обычный расчет устойчивости насыпей выполняется графоаналитическим способом по методике Г.М. Шахунянца [1, 2] при ста-

тически приложенной нагрузке от подвижного состава и круглоцилиндрической поверхности смещения (см. рис. 1). Учет динамического воздействия от поездов производится введением коэффициента $K_{дин}$.

Вид грунтов и их физико-механические и сдвиговые характеристики определяются на основе инженерно-геологического обследования. В учебных целях используются справочные данные [3–5]. Характеристики железнодорожного пути, нагрузки от верхнего строения пути, локомотивов и другие принимаются по литературным источникам [6, 7].

Для снижения динамической нагрузки на пойменные насыпи, находящиеся в сложных условиях, рационально использовать современные типы рельсов, щебень твердых пород, упругие промежуточные рельсовые скрепления, в частности подкладочные с двумя демпфирующими прокладками [8, 9]. Такой подход в ОАО «РЖД» и АО «НК «КТЖ»» (Казахстан) является основой ведения путевого хозяйства [10].

После этого вычерчивается поперечник пойменной насыпи с послойным разделением грунтов по влажности и их сдвиговым характеристикам (рис. 3). Далее строится кривая обрушения, выбираются отсеки для расчета, затем измеряются параметры: площадь отсеков, расстояние до вертикального радиуса кривой обрушения [3]. По полученным данным и существующим формулам производится расчет в табличной форме (таблица). Данный метод трудоемкий и имеет неизбежные погрешности.



Расчет устойчивости пойменной насыпи в табличной форме

Показатель	Номер отсека															Сумма
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
X_i , м	40,50	38,40	35,70	32,40	28,90	26,10	23,20	19,10	15,20	12,60	9,80	6,00	1,80	-1,80	-4,40	
$\sin \alpha_i = X_i / R_1$	0,7656	0,7259	0,6749	0,6125	0,5463	0,4934	0,4386	0,3611	0,2873	0,2382	0,1853	0,1134	0,0340	0,0340	0,0832	
α_i	49,96	46,54	42,44	37,77	33,11	29,56	26,01	21,17	16,70	13,78	10,68	6,51	1,95	1,95	4,77	
$\cos \alpha_i$	0,643	0,687	0,737	0,790	0,837	0,869	0,898	0,932	0,957	0,971	0,982	0,993	0,999	0,999	0,996	
ω_1 , м ²	4,20	26,90	19,20	31,40	31,00	15,50	26,40	18,00	12,10	2,80	11,00	2,60				
ω_2 , м ²						0,90	7,60	13,80	19,50	4,10	22,70	17,50	18,60	7,60	4,10	$\Sigma \omega_2 = 116,40$
ω_3 , м ²										0,10	2,10	3,00	4,30	2,30	1,50	$\Sigma \omega_3 = 13,30$
$Q_1 = \omega_1 \rho$, кН/м	75,04	480,6	343,0	561,0	553,8	276,9	471,6	321,6	216,1	50,03	196,5	46,45	0,00			
$Q_2 = \omega_2 \rho_B$, кН/м	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,94	75,49	137,08	193,70	40,73	225,49	173,84	184,76	75,49	40,73	
$Q_3 = \omega_3 \rho_B'$, кН/м										0,96	20,15	28,79	41,27	22,07	14,40	
$\Sigma Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$	75,04	480,61	343,04	561,01	553,87	285,87	547,17	458,68	409,89	91,71	442,18	249,08	226,03	97,57	55,12	
$\Sigma T = \Sigma Q \sin \alpha_i$	57,45	348,8	231,5	343,6	302,5	141,0	239,9	165,6	117,7	21,84	81,92	28,25	7,69	3,32	4,58	$\Sigma T_{сдв} = 2\,088,13$ $\Sigma T_{уд} = 7,90$
$\Sigma N = \Sigma Q \cos \alpha_i$	48,27	330,5	253,1	443,4	463,9	248,6	491,7	427,7	392,6	89,07	434,5	247,4	225,9	97,51	54,93	
$f_1 = \operatorname{tg} \varphi_{\text{нас}}$	0,5609	0,5609	0,5609	0,5609	0,5609											
$f_2 = 0,75 f_1$						0,4207	0,4207	0,4207	0,4207							
$f_3 = 0,75 \operatorname{tg} \varphi_{\text{осн}}$										0,3030	0,3030	0,3030	0,3030	0,3030	0,3030	
N/f_i , кН/м	27,08	185,41	141,99	248,74	260,20	104,60	206,86	179,94	165,16	26,99	131,67	74,99	68,45	29,55	16,65	
C_1 , кН/м ²	25,30	25,30	25,30	25,30	25,30											
C_2 , кН/м ²						12,65	12,65	12,65	12,65							
C_3 , кН/м ²										20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
l_i , м	4,20	4,00	3,50	4,60	4,20	2,20	4,50	4,30	4,40	0,80	4,50	3,40	4,40	2,90	4,30	
$C_i l_i$, кН/м	106,26	101,20	88,55	116,38	106,26	27,83	56,93	54,40	55,66	16,00	90,00	68,00	88,00	58,00	86,00	$\Sigma C_i l_i = 1\,119,46$
D_0 , кН/м	$D_0 = \rho_w \cdot \Sigma(\omega_2 + \omega_3) J_0 = 9,81(116,4 + 13,3) \cdot 0,05 = 64$															
$K_{\text{ст}}$	$K_{\text{ст}} = \frac{\Sigma N f + \Sigma C l + \Sigma T_{\text{уд}}}{\Sigma T_{\text{сд}} + D_0} = \frac{1868 + 1119 + 7,9}{2\,088 + 64} = 1,392$															
$K_{\text{дин}}$	$K_{\text{дин}} = \frac{K_{\text{ст}}}{a_d} = \frac{1,392}{1,07} = 1,301$															
[K]	1,2															

Примечание. X_i – расстояние от центра i -го отсека до вертикального радиуса кривой обрушения; α_i – угол сдвига грунтового отсека, град; R_1 – радиус кривой обрушения, м; ω_1 , ω_2 , ω_3 – площадь верхнего, среднего и нижнего слоев грунта в отсеке соответственно; Q_1 , Q_2 , Q_3 – вес соответствующего слоя в отсеке; ρ , $\rho_{в'}$, $\rho_{в'}$ – влажность сухого, влажного грунтов насыпи, влажного грунта основания насыпи соответственно; T – касательная составляющая сил отсека; N – нормальная составляющая; f_1 , f_2 , f_3 – коэффициент внутреннего трения грунта в основании i -го отсека длиной l_i ; $\varphi_{нас}$ – угол внутреннего трения грунта насыпи; $\varphi_{осн}$ – угол внутреннего трения грунта основания насыпи; C_1 , C_2 , C_3 – удельное сцепление соответствующего слоя; D_0 – гидродинамическая сила, возникающая при вытекании воды из насыпи и действующая в центре тяжести водонасыщенной части блока смещения; $K_{ст}$, $K_{дин}$ – коэффициент устойчивости при статическом и динамическом нагружении на грунт тела насыпи; $[K]$ – допускаемое значение коэффициента устойчивости.

Для сокращения времени расчета и возможности варьирования проектными данными разработана программа расчета устойчивости откосов и построения поперечного профиля пойменной насыпи с использованием Visual Basic и AutoCad. Ввод исходных данных показан на рис. 4.

В программе можно задать основные характеристики для пойменной насыпи: категорию пути, тип рельсов, радиус кривой, количество путей, высоту насыпи, ширину бермы, вид грунтов, точку начала кривой обрушения и др. Для упрощения ввода данных составлены выпадающие списки.

Когда исходные данные введены, необходимо нажать кнопку «Составить таблицу расчета устойчивости насыпи», после чего будет произведен расчет.

Промежуточные расчеты основных параметров приведены в табличной форме (рис. 5).

В разработанной программе все описанные выше действия выполняются в автоматическом режиме. Все линии пойменной насыпи, а также вспомогательные линии построения записаны в виде уравнений.

Таким образом, расчет упрощается и сводится от графоаналитического способа к аналитическому. Результаты расчета также выводятся в стандартную расчетную таблицу. По ней и производится анализ устойчивости насыпи.

В данной программе имеется возможность подбора проектных параметров:

- высоты насыпи,
- уклона местности,
- количества путей,

Категория
Тип рельсов
Радиус кривой R , м
Количество путей
Поперечный уклон местности ($1 : n$)
Высота насыпи H , м
Подвижной состав
Тип шпал
Горизонт высокой воды (ГВВ), м
Высота подпора воды перед мостом $h_{пв}$, м
Высота ветрового нагона Δz , м
Высота ветровой волны h , м
Длина волны λ , м
Ширина бермы, м
Угол поворота β , град
Грунт тела насыпи
Грунт основания насыпи
Точка начала обрушения

Рис. 4. Вид исходных данных в программе

Высота наката на откос фронтально подходящих волн h_n , м	0,750
Отметка бровки бермы Γ_6 , м	6,870
Уширение основной площадки на кривых участках пути Δb , м	0,4
Габаритное уширение междупутного расстояния на кривых участках Δm	0
Расстояние между осями смежных путей на прямом участке M , м	0
Нормативная ширина основной площадки на прямом участке b , м	7,6
Ширина основной площадки B , м	8
Длина шпалы l , м	2,7
Интенсивность вибродинамической нагрузки от подвижного состава $P_{пв}$, кН	73,902
Удельный вес грунта насыпи γ , кН/м ³	17,867
Ширина полосовой нагрузки $b_{вс}$, м	4,9
Давление от веса верхнего строения пути $P_{вс}$, кПа	17
Высота фиктивного столбика грунта $z_{ф}$, м	5,863
Радиус кривой обрушения R_1 , м	55,075
Коэффициент динамики a_d	1,07

Рис. 5. Промежуточные расчеты основных параметров

- ширины бермы,
- вида грунтов и их свойств,
- места (точки) начала возможной кривой обрушения на основной площадке земляного полотна насыпи. Это позволяет найти критическое место с наибольшей вероятностью обрушения.

В результате расчетов по программе определяется количество отсеков, высчитывается их площадь, длины, расстояния, уклоны и остальные параметры и в конечном итоге определяется коэффициент устойчивости. Если он не удовлетворяет нормативным требованиям, можно подбирать коэффициент устойчивости, изменяя величину уклонов, ширину бермы или вид грунта, приближая его к нормативному значению.

Программа позволяет для достижения необходимой устойчивости осуществлять подбор грунтов с необходимыми сдвиговыми характеристиками и изменять конфигурацию поперечного профиля с целью оптимизации строительных работ и минимизации финансовых затрат. Поэтому многовариантные расчеты выполняются с большой точностью и скоростью.

После внесения изменений в проект уже можно оценивать их экономическую составляющую. При подборе вида грунта с необходимыми свойствами следует учитывать, что стоимость существенно зависит от района проектирования и дальности доставки. При изменении ширины бермы и пологости откосов изменяется и объем земляных работ, что также сказывается на проектной стоимости объекта. Экономическая оценка должна производиться

в тесной связи с требованиями безопасности при строительстве и эксплуатации.

Для визуальной оценки проведенных расчетов предусмотрена также возможность автоматизированного построения поперечного профиля пойменной насыпи по данным расчетной таблицы. Построение выполняется после анализа результатов программных расчетов с использованием графического редактора AutoCad. Для этого необходимо скопировать текст из расчетной программы и вставить его в командную строку *AutoCad*.

Пример построения насыпи показан на рис. 6.

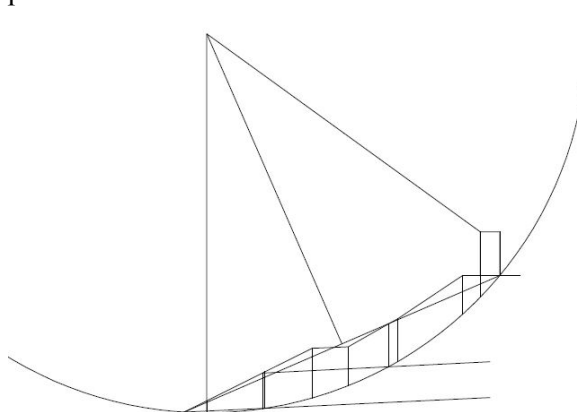


Рис. 6. Построение пойменной насыпи с использованием AutoCad

Итак, данные результаты показывают хорошую сходимость с результатами практического расчета графоаналитическим способом, но имеют большую точность, скорость и многовариантность принятия решений на основе технико-экономического обоснования и требований заказчика строительства.

Библиографический список

1. Железнодорожный путь: Учеб. / Е.С. Ашпиз, А.И. Гасанов, Б.Э. Глюзберг и др.; Под. ред. Е.С. Ашпиза. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. 544 с.
2. Железнодорожный путь: Учеб. / Г.М. Шахунянц и др. М.: Транспорт, 1987. 467 с.
3. Косенко С.А. Устройство транспортных сооружений в особых условиях: Учеб.-метод. пособие. Алматы: КазАТК, 2013. 160 с.
4. Фришман М.А. Земляное полотно железных дорог. М.: Транспорт, 2002. 325 с.
5. Справочник по земляному полотну эксплуатируемых железных дорог / М.В. Аверочкина, С.С. Бабицкая, С.М. Большаков и др.; Под ред. А.Ф. Подпалого, М.А. Чернышева, В.П. Титова. М.: Транспорт, 1978. 766 с.
6. Косенко С.А. Верхнее строение пути: Учеб.-метод. пособие. Алматы: КазАТК, 2014. 366 с.
7. Расчеты и проектирование железнодорожного пути / В.В. Виноградов, А.М. Никонов, Т.Г. Яковлева и др. М.: Маршрут, 2003. 485 с.

8. Инструкция по устройству подбалластных защитных слоев при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12 декабря 2012 г. № 2544р.

9. Васюкевич Е.Б. О разработке основных направлений обеспечения надежной эксплуатации инженерных сооружений // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 6. С. 2–9.

10. Косенко С.А., Исмагулова С.О., Сулова Т.М. Новая структура ведения путевого хозяйства на железных дорогах Казахстана // Вестник ВНИИЖТа. 2012. № 6. С. 39–42.

S. Kosenko, M. Eshimov, E. Koptev

Development of a software system of calculation of floodplain embankments stability

Abstract. An analytical method of calculating of floodplain embankments stability by an intentionally developed software system is suggested. The proposed programme provides a possibility to select constructive parameters, which allow to identify the part of construction most possible to collapse. To achieve the required stability of the construction, the programme implements the selections of soil with necessary shifting characteristics and changes the configuration of the transverse profile. It leads to the optimization of construction and to minimizing costs.

Key words: *floodplain embankment; programming of calculation; slope stability; constructing a profile.*

Косенко Сергей Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство» СГУПС. E-mail: kosenko.s.a@mail.ru

Ешимов Марат Жангелдинович – студент, аспирант-стажер кафедры «Тоннели и метрополитены» СГУПС. E-mail: marat.eshimov@gmail.com

Коптев Евгений Алексеевич – студент, аспирант-стажер кафедры «Тоннели и метрополитены» СГУПС. E-mail: k_djon_08@mail.ru