



ISSN 1609-1817

М. ТЫНЫШБАЕВ атындағы
ҚАЗАҚ КӨЛК ЖӘНЕ КОММУНИКАЦИЯЛАР АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

ХАБАРШЫСЫ ВЕСТНИК

КАЗАХСКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
имени М. ТЫНЫШПАЕВА



№ 4 - 2013

СОДЕРЖАНИЕ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ
ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Исаханов Е.А., Квашнин М.Я., Абиев Б.А., Алпыспаева Ж.
Сопротивление сдвигу несвязных грунтов при статических и вибрационных нагрузках..... 4

Украинец В.Н., Гирнис С.Р., Ахметжанова М.М.
Расчет перегонного тоннеля метрополитена глубокого залегания на транспортную нагрузку..... 10

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ

Алижан А., Ахметов К., Алтаев О.
Исследование напряженно-деформированного состояния гребней колес локомотивов методом конечно-элементного моделирования..... 17

Кубекова В.К., Арипбаева А.О., Тулеуленова Э. М.
Оптимизация числа вагонов в составах поездов в условиях непостоянства объемов поставок..... 26

Мусабеков М.О., Елшибеков А.М., Жунисбеков Н.М.
Совершенствование смесеобразования в тепловозных дизелях с применением аккумуляторных систем топливоподачи..... 32

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Айкумбеков М.Н., Мауленов Н.С., Тасбалтаулы Д.
Типы структур автоматизированной системы управления грузовой станцией..... 37

Богданович С.В., Киселева О.Г.
Проблемы и перспективы организации пассажирских перевозок в Республике Казахстан..... 42

**АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА, СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА,
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**

Битилеуова З.К., Мурзабекова К.А., Григорьева П.Т.
Математическое моделирование на базе современной вычислительной техники..... 46

Ведерников Б.М., Максымбаева Т.Е.
Особенности проектирования систем интервального регулирования движения поездов с применением радиоканала..... 51

Ефимова О.Н., Айтмухамбетов А.И.
Польза от энергосберегающих мероприятий на промышленном предприятии города Алматы..... 56

УДК 539.3

Украинец Виталий Николаевич – д. т. н., профессор (г. Павлодар, ПГУ)
 Гирнис Светлана Римонтасовна – к. т. н., доцент (г. Павлодар, ПГУ)
 Ахметжанова Макпал Манарбековна – инженер (г. Алматы, ИМММ)

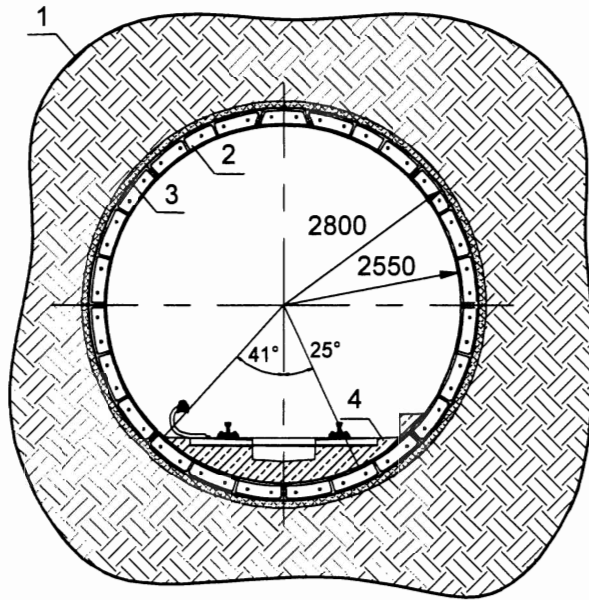
РАСЧЕТ ПЕРЕГОННОГО ТОННЕЛЯ МЕТРОПОЛИТЕНА ГЛУБОКОГО ЗАЛЕГАНИЯ НА ТРАНСПОРТНУЮ НАГРУЗКУ

В настоящее время научными, проектными и строительными организациями накоплен большой опыт успешной реализации сложных проектов подземного строительства. Созданы новые прогрессивные конструктивные решения подземных объектов, разработаны эффективные аналитические и численные методы их расчёта большинства различных видов нагрузок и воздействий. Тем не менее, до сих пор практически отсутствуют действенные методы расчёта тоннелей на транспортные нагрузки (подвижные нагрузки от движущегося внутритоннельного транспорта), хотя мировая практика эксплуатации тоннелей свидетельствует о многочисленных повреждениях и разрушениях, которым данные сооружения подвергаются вследствие их воздействия. Экспериментальные исследования показывают, что воздействие транспортных нагрузок на тоннель приводит к возникновению вибраций как в самом сооружении, так и в окружающем его породном массиве. С увеличением скорости движения нагрузок вибрации возрастают. Превышение уровней вибраций допустимых норм может привести к потере несущей способности конструкций тоннеля или их непригодности для нормальной эксплуатации, а при его мелком заложении – к тем же последствиям для расположенных вблизи наземных сооружений. Кроме того, вибрации оказывают неблагоприятные воздействия на различные технологические процессы повышенной точности и людей. Поэтому, наряду со статическим расчётом транспортных тоннелей, необходимо всестороннее изучение происходящих в них динамических процессов, *актуальность* которых обусловлена намечающейся в последние годы тенденцией в сторону увеличения скоростей транспортных средств.

Аналитическое решение задачи о действии подвижной нагрузки на бесконечно длинную двухслойную круговую цилиндрическую оболочку в упругом пространстве, полученное Гирнис С.Р. [1] подтверждает, что внутренний слой оболочки полагался толстым и его движение описывалось динамическими уравнениями теории упругости, наружный слой – тонким, для которого использовалась классическая теория тонких оболочек. В настоящей работе решение задачи бегущей внутри нагрузки, заключённой в тонкостенную обойму цилиндра в упругом пространстве применяется для динамического расчёта перегонного тоннеля метрополитена глубокого заложения (нагрузки, передаваемой обделке тоннеля подвижным составом). Научная новизна работы состоит в разработке методики динамического расчёта напряженно-деформированного состояния рассматриваемого тоннеля с учетом взаимодействия конструкции и окружающего массива, а также скорости движения подвижного состава.

Рассмотрим тоннель глубокого заложения, подкрепленный сборной тубинговой чугунной обделкой с радиусами наружной и внутренней поверхностей, соответственно $R_1 = 2,8$ м и $R_2 = 2,55$ м (рисунок 1). Обделка выполнена из 9 чугунных тубингов [2] в кольце (марка чугуна СЧ20: коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, модуль упругости $E = 10^5$ МПа, плотность $\rho = 7,2 \cdot 10^3$ кг/м³ [3]) с заполнением закрепного пространства цементным раствором. Размеры тубинга (рисунок 2): ширина $b = 750$ мм, толщина спинки и ребер $t = 35$ мм, высота ребер $h = 215$ мм. Окружающий тоннель массив – суглинок ($\nu = 0,35$,

$E = 0,51 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, $\rho = 1,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ [4-6]).



1 – породный массив; 2 – чугунная тубинговая обделка; 3 – цементный раствор;
4 – железобетонное основание пути

Рисунок 1 – Поперечное сечение тоннеля

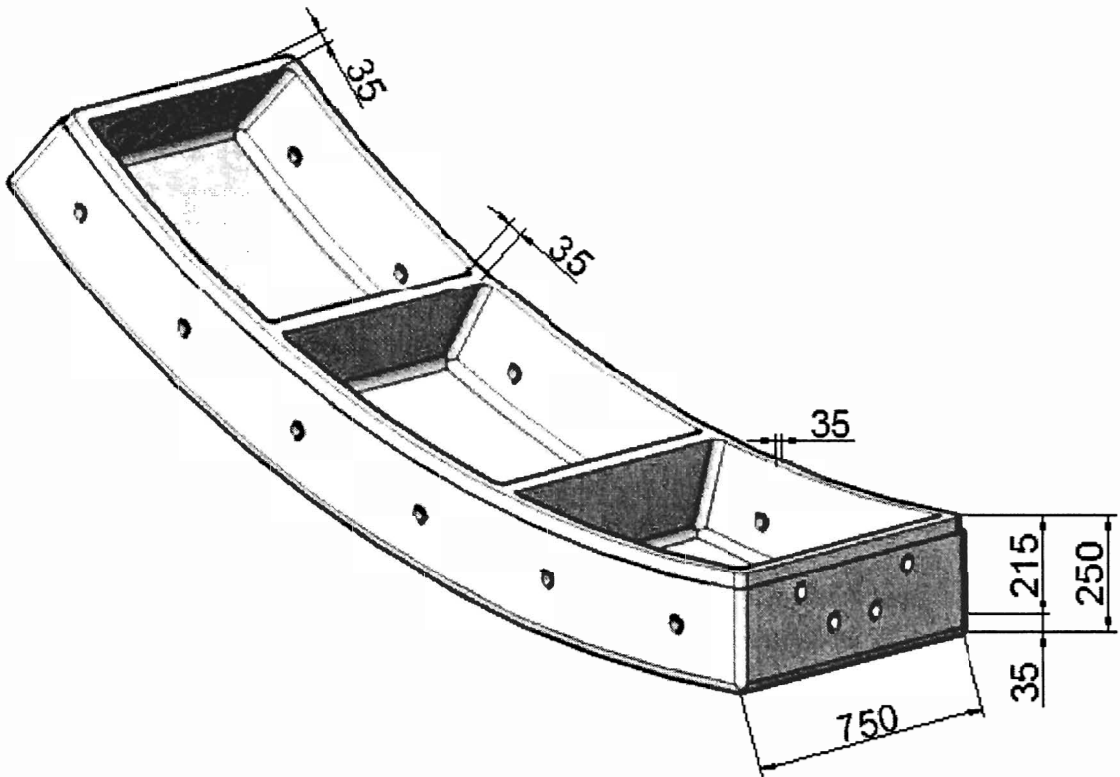


Рисунок 2 – Тубинг сборной обделки

Действующая на тоннель нагрузка от движущегося с постоянной скоростью s поезда показана на рисунке 3 [7,8].

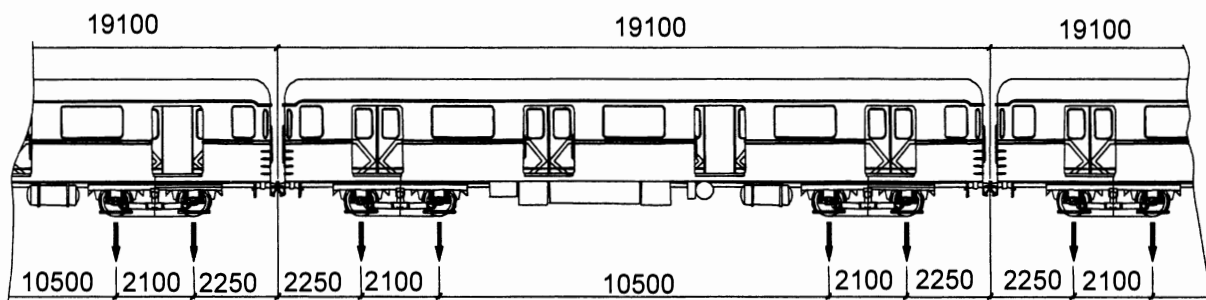


Рисунок 3 – Нагрузка на тоннель от подвижного состава

При расчете сборную обделку рассматриваем как двухслойную оболочку (рисунок 4), используя метод «размазывания» ребер тубингов [9]. Согласно этому методу, внешним слоем такой оболочки являются спинки тубингов, внутренним квазиоднородным слоем – сплошной слой, масса которого равна массе ребер тубингов, а толщина – высоте ребер. Значения плотности и модуля упругости материала эквивалентного тубинговым ребрам квазиоднородного слоя будут меньше, чем материала ребер (в нашем случае $\rho = 1,152 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $E = 0,16 \cdot 10^5 \text{ МПа}$).

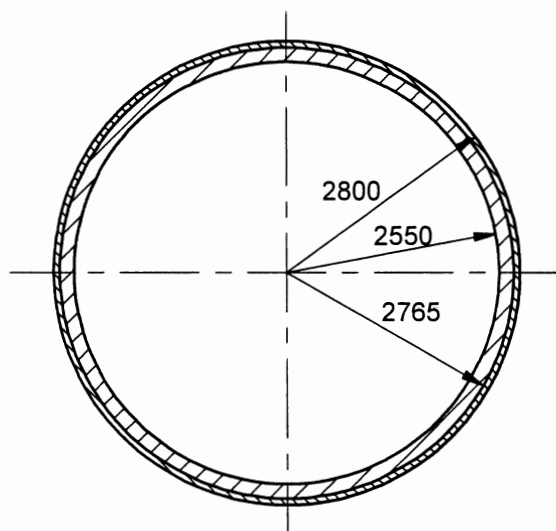


Рисунок 4 – Расчетная схема поперечного сечения обделки

Отделяющий обделку от массива цементный слой в расчет не принимаем, что даст некоторый (незначительный) запас прочности обделки. Контакт между обделкой и массивом принимаем скользящим.

При моделировании действующей на обделку тоннеля вертикальной транспортной нагрузки от двух смежных вагонов в окрестности участка их сцепления полагаем, что она равномерно распределена по контактирующей с бетонным основанием пути поверхности обделки длиной 8,7 м (см. рисунок 5, а, б, где P° – интенсивность поверхностной нагрузки, r, θ, η – связанная с нагрузкой подвижная цилиндрическая система координат). На рисунке 5, в, г показаны составляющие интенсивности данной нагрузки: нормальная радиальная – P_r (рисунок 5, в) и касательная тангенциальная – P_θ (рисунок 5, г). Действием последней составляющей – P_θ , в силу её незначительного влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС) тоннеля, пренебрегаем [10].

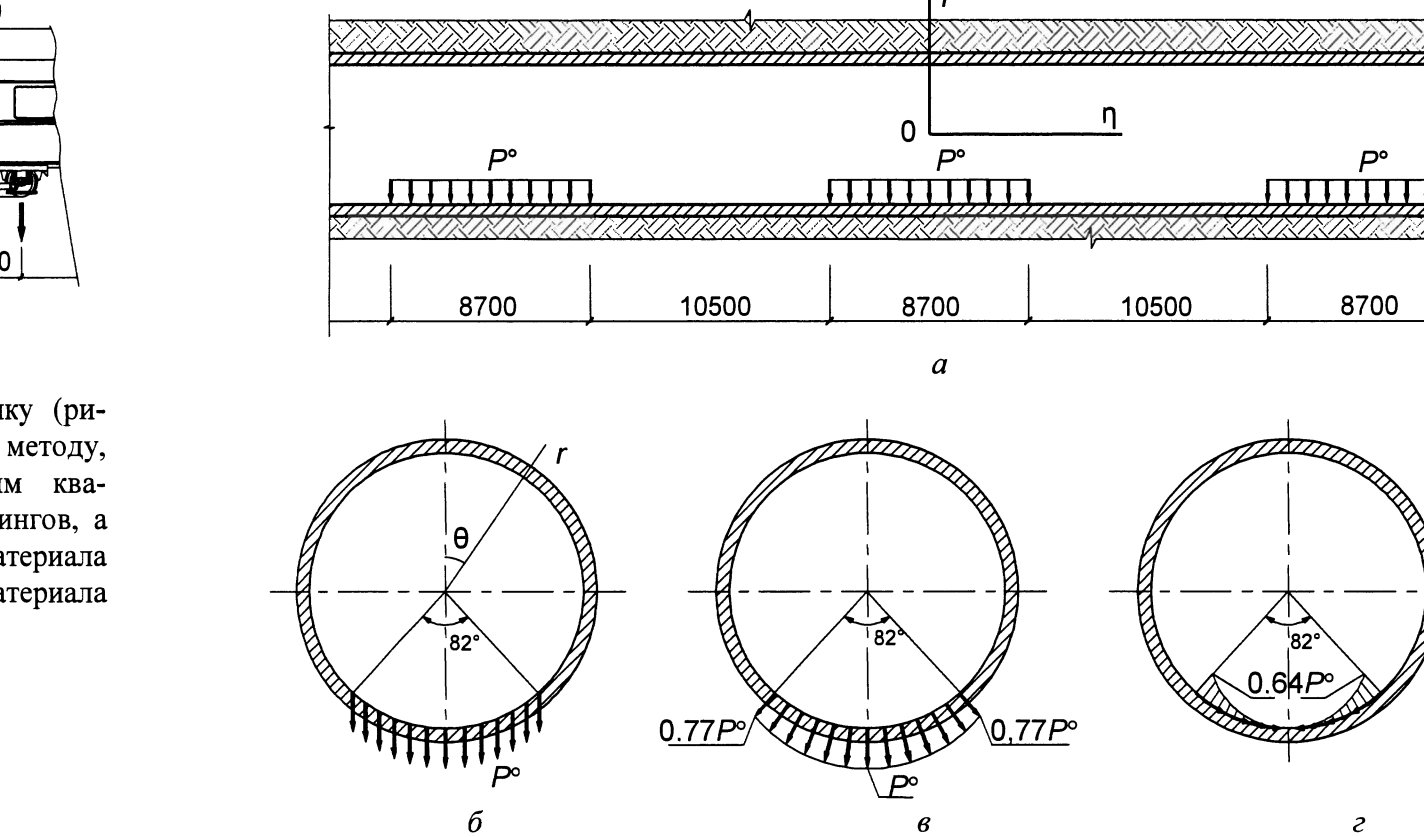


Рисунок 5 – Действие транспортной нагрузки на обделку

Исследования, проведенные Украинцем В.Н. и Гирнисом С.Р., показали, что при проектировании, расчете и эксплуатации тоннелей необходимо учитывать возможность перехода скорости c движения транспортной нагрузки через первую (нижнюю) критическую скорость c^* , вызывающую в тоннеле резонансные явления [11]. Возникающие в этом случае незатухающие вдоль оси тоннеля колебания могут привести к повреждению или разрушению. Критическую скорость c^* нагрузки можно определить по дисперсионной кривой $c(\xi)$, где ξ – волновое число. Построенная для данного случая дисперсионная кривая показана на рисунке 6.

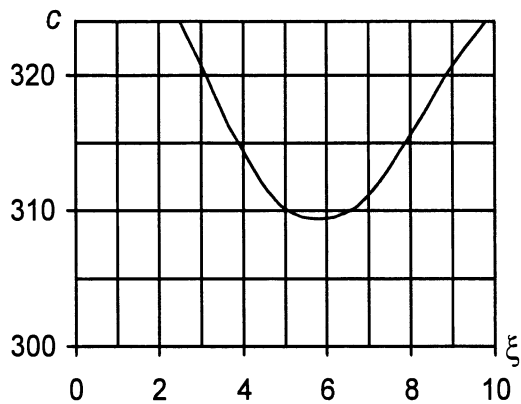


Рисунок 6 – Дисперсионная кривая $c(\xi)$

Минимум кривой соответствует значению критической скорости $c_* \approx 310$ м/с, то есть безопасные, не вызывающие резонансных явлений и незатухающих колебаний в тоннеле, значения скоростей транспортной нагрузки ограничены интервалом $0 < c < 310$ м/с.

В таблицах 1, 2 приведены результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния рассматриваемого тоннеля в поперечном сечении $\eta = 0$ (посередине участка нагружения обделки $|\eta| \leq 4,35$ м одной из нагрузок (рисунок 5, а)) при докритической скорости движения состава $c = 70$ км/ч. Обозначения в таблицах: $u_r^\circ = u_r \mu / P^\circ$, м, $\sigma_{\theta\theta}^\circ = \sigma_{\theta\theta} / P^\circ$, $\sigma_{\eta\eta}^\circ = \sigma_{\eta\eta} / P^\circ$, где u_r – радиальные перемещения, $\sigma_{\theta\theta}$ и $\sigma_{\eta\eta}$ – соответственно тангенциальные и осевые нормальные напряжения, $\mu = E / 2(1+\nu)$ – модуль сдвига массива.

Таблица 1 – Компоненты НДС обделки в сечении $\eta = 0$

Комп. НДС	θ , град										
	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
Внутренняя поверхность тубинговых спинок											
u_r°	-0,016	-0,018	-0,014	0,006	0,032	0,043	0,051	0,066	0,089	0,115	0,127
$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	-4,574	-2,066	3,437	7,660	8,719	8,830	9,289	11,56	12,82	10,95	9,305
$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-3,062	-2,408	-2,115	-3,482	-4,188	-3,598	-2,570	-0,999	-1,997	-4,504	-5,759
Наружная поверхность обделки											
u_r°	0,016	-0,018	-0,014	0,006	0,032	0,043	0,051	0,066	0,089	0,115	0,126
$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	0,081	1,625	6,067	10,54	12,16	12,24	12,51	14,81	17,60	17,92	17,29
$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	11,68	10,25	7,760	6,770	7,345	7,908	8,637	11,03	14,84	18,58	20,14

Таблица 2 – Компоненты НДС контактирующей с обделкой поверхности массива в сечении $\eta = 0$

Комп. НДС	θ , град										
	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
u_r°	-0,016	-0,018	-0,014	0,006	0,032	0,043	0,051	0,066	0,089	0,115	0,126
$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	-0,121	-0,099	0,086	-0,129	-0,171	-0,170	-0,153	-0,116	-0,140	-0,214	-0,254
$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-0,307	-0,276	-0,266	-0,358	-0,458	-0,471	-0,457	-0,412	-0,438	-0,526	-0,574

Из анализа напряжённного состояния тоннеля следует, что компоненты напряжённного состояния наружной поверхности обделки и контактирующей с ней поверхности массива значительно отличаются. В частности, при переходе от поверхности обделки к поверхности массива абсолютные значения напряжений существенно снижаются. При этом на контактирующей с обделкой поверхности массива возникают только сжимающие напряжения $\sigma_{\theta\theta}$, $\sigma_{\eta\eta}$, достигающие наибольших по абсолютной величине значений в пределах участка нагружения тоннеля. Здесь же, как показали расчёты, возникают наибольшие по абсолютной величине сжимающие радиальные напряжения σ_{rr} ($\max|\sigma_{rr}| = 0,38P^\circ$). Таким образом, в пределах участка нагружения тоннеля массив подвергается наибольшему всестороннему сжатию, что может привести к его уплотнению (особенно в случае слабых грунтов) и, следовательно, – к оседанию тоннеля с отрывом

Минимум кривой соответствует значению критической скорости $c_* \approx 310 \text{ м/с}$, то есть безопасные, не вызывающие резонансных явлений и незатухающих колебаний в тоннеле, значения скоростей транспортной нагрузки ограничены интервалом $0 < c < 310 \text{ м/с}$.

В таблицах 1, 2 приведены результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния рассматриваемого тоннеля в поперечном сечении $\eta = 0$ (посередине участка нагружения обделки $|\eta| \leq 4,35 \text{ м}$ одной из нагрузок (рисунок 5, а)) при докритической скорости движения состава $c = 70 \text{ км/ч}$. Обозначения в таблицах: $u_r^\circ = u_r \mu / P^\circ$, м, $\sigma_{\theta\theta}^\circ = \sigma_{\theta\theta} / P^\circ$, $\sigma_{\eta\eta}^\circ = \sigma_{\eta\eta} / P^\circ$, где u_r – радиальные перемещения, $\sigma_{\theta\theta}$ и $\sigma_{\eta\eta}$ – соответственно тангенциальные и осевые нормальные напряжения, $\mu = E / 2(1+\nu)$ – модуль сдвига массива.

Таблица 1 – Компоненты НДС обделки в сечении $\eta = 0$

Комп. НДС	θ , град										
	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
Внутренняя поверхность тубинговых спинок											
u_r°	-0,016	-0,018	-0,014	0,006	0,032	0,043	0,051	0,066	0,089	0,115	0,127
$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	-4,574	-2,066	3,437	7,660	8,719	8,830	9,289	11,56	12,82	10,95	9,305
$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-3,062	-2,408	-2,115	-3,482	-4,188	-3,598	-2,570	-0,999	-1,997	-4,504	-5,759
Наружная поверхность обделки											
u_r°	0,016	-0,018	-0,014	0,006	0,032	0,043	0,051	0,066	0,089	0,115	0,126
$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	0,081	1,625	6,067	10,54	12,16	12,24	12,51	14,81	17,60	17,92	17,29
$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	11,68	10,25	7,760	6,770	7,345	7,908	8,637	11,03	14,84	18,58	20,14

Таблица 2 – Компоненты НДС контактирующей с обделкой поверхности массива в сечении $\eta = 0$

Комп. НДС	θ , град										
	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
u_r°	-0,016	-0,018	-0,014	0,006	0,032	0,043	0,051	0,066	0,089	0,115	0,126
$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	-0,121	-0,099	0,086	-0,129	-0,171	-0,170	-0,153	-0,116	-0,140	-0,214	-0,254
$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-0,307	-0,276	-0,266	-0,358	-0,458	-0,471	-0,457	-0,412	-0,438	-0,526	-0,574

Из анализа напряжённного состояния тоннеля следует, что компоненты напряжённного состояния наружной поверхности обделки и контактирующей с ней поверхности массива значительно отличаются. В частности, при переходе от поверхности обделки к поверхности массива абсолютные значения напряжений существенно снижаются. При этом на контактирующей с обделкой поверхности массива возникают только сжимающие напряжения $\sigma_{\theta\theta}$, $\sigma_{\eta\eta}$, достигающие наибольших по абсолютной величине значений в пределах участка нагружения тоннеля. Здесь же, как показали расчёты, возникают наибольшие по абсолютной величине сжимающие радиальные напряжения σ_{rr} ($\max|\sigma_{rr}| = 0,38P^\circ$). Таким образом, в пределах участка нагружения тоннеля массив подвергается наибольшему всестороннему сжатию, что может привести к его уплотнению (особенно в случае слабых грунтов) и, следовательно, – к оседанию тоннеля с отрывом

Минимум кривой соответствует значению критической скорости $c^* \approx 310\text{м/с}$, то есть безопасные, не вызывающие резонансных явлений и незатухающих колебаний в тоннеле, значения скоростей транспортной нагрузки ограничены интервалом $0 < c < 310\text{м/с}$.

В таблицах 1, 2 приведены результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния рассматриваемого тоннеля в поперечном сечении $\eta = 0$ (посередине участка нагружения обделки $|\eta| \leq 4,35\text{м}$ одной из нагрузок (рисунок 5, а)) при докритической скорости движения состава $c = 70\text{ км/ч}$. Обозначения в таблицах: $u_r^\circ = u_r \mu / P^\circ$, м, $\sigma_{\theta\theta}^\circ = \sigma_{\theta\theta} / P^\circ$, $\sigma_{\eta\eta}^\circ = \sigma_{\eta\eta} / P^\circ$, где u_r – радиальные перемещения, $\sigma_{\theta\theta}$ и $\sigma_{\eta\eta}$ – соответственно тангенциальные и осевые нормальные напряжения, $\mu = E / 2(1+\nu)$ – модуль сдвига массива.

Таблица 1 – Компоненты НДС обделки в сечении $\eta = 0$

Комп. НДС	θ , град										
	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
Внутренняя поверхность тубинговых спинок											
u_r°	-0,016	-0,018	-0,014	0,006	0,032	0,043	0,051	0,066	0,089	0,115	0,127
$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	-4,574	-2,066	3,437	7,660	8,719	8,830	9,289	11,56	12,82	10,95	9,305
$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-3,062	-2,408	-2,115	-3,482	-4,188	-3,598	-2,570	-0,999	-1,997	-4,504	-5,759
Наружная поверхность обделки											
u_r°	0,016	-0,018	-0,014	0,006	0,032	0,043	0,051	0,066	0,089	0,115	0,126
$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	0,081	1,625	6,067	10,54	12,16	12,24	12,51	14,81	17,60	17,92	17,29
$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	11,68	10,25	7,760	6,770	7,345	7,908	8,637	11,03	14,84	18,58	20,14

Таблица 2 – Компоненты НДС контактирующей с обделкой поверхности массива в сечении $\eta = 0$

Комп. НДС	θ , град										
	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
u_r°	-0,016	-0,018	-0,014	0,006	0,032	0,043	0,051	0,066	0,089	0,115	0,126
$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	-0,121	-0,099	0,086	-0,129	-0,171	-0,170	-0,153	-0,116	-0,140	-0,214	-0,254
$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-0,307	-0,276	-0,266	-0,358	-0,458	-0,471	-0,457	-0,412	-0,438	-0,526	-0,574

Из анализа напряжённного состояния тоннеля следует, что компоненты напряжённного состояния наружной поверхности обделки и контактирующей с ней поверхности массива значительно отличаются. В частности, при переходе от поверхности обделки к поверхности массива абсолютные значения напряжений существенно снижаются. При этом на контактирующей с обделкой поверхности массива возникают только сжимающие напряжения $\sigma_{\theta\theta}$, $\sigma_{\eta\eta}$, достигающие наибольших по абсолютной величине значений в пределах участка нагружения тоннеля. Здесь же, как показали расчёты, возникают наибольшие по абсолютной величине сжимающие радиальные напряжения σ_{rr} ($\max|\sigma_{rr}| = 0,38P^\circ$). Таким образом, в пределах участка нагружения тоннеля массив подвергается наибольшему всестороннему сжатию, что может привести к его уплотнению (особенно в случае слабых грунтов) и, следовательно, – к оседанию тоннеля с отрывом

верхней части обделки от массива. Анализ деформированного состояния тоннеля показывает, что положение и круговая форма поперечного сечения обделки меняются – сечение опускается, вытягиваясь по вертикали (рисунок 7). Указанные факторы могут оказать негативное влияние на конструкцию обделки.

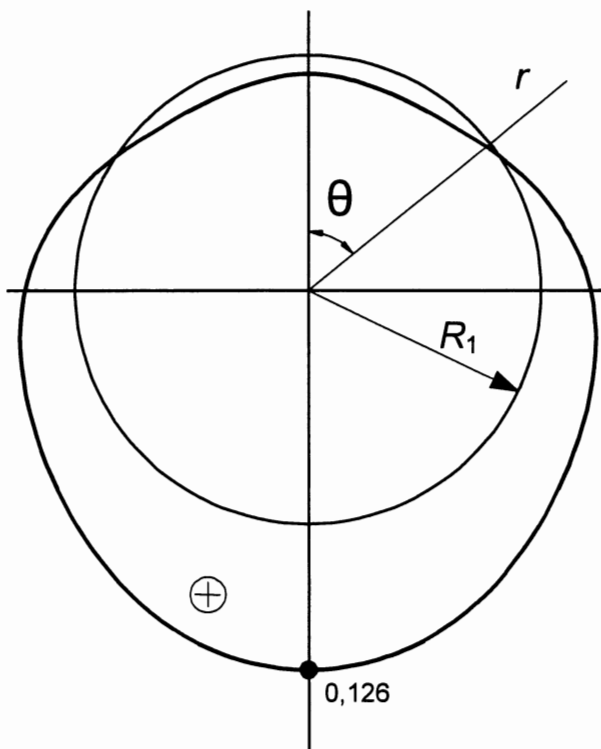


Рисунок 7 – Эпюра радиальных перемещений u_r , м на контуре поперечного сечения $\eta = 0$ наружной поверхности обделки

Например, на Замоскворецкой линии Московского метрополитена из-за многократного воздействия на слабые грунты вибрационных нагрузок, вызываемых движущимся составом, тоннельные конструкции начали расшатываться. Глины, на которые опирается сборная обделка тоннеля, уплотнились, тоннель стал "садиться". Возникли опасные явления: вследствие "отлипания" верхней части обделки от грунта произошло нарушение её прочного контакта с породой, круглая форма поперечного сечения тоннеля превратилась в эллипсообразную, на стыке между тубингами появились микротрещины.

Выводы

1. При проектировании, расчете и эксплуатации перегонных тоннелей метрополитена необходимо учитывать возможность перехода скорости движения транспортной нагрузки через первую (низшую) критическую скорость, вызывающую в тоннеле резонансные явления.

2. Вследствие воздействия на тоннель транспортной нагрузки, положение и форма поперечного сечения его обделки меняются (сечение опускается, вытягиваясь по вертикали), что может привести к таким негативным последствиям, как нарушение прочного контакта верхней части обделки с породой и появление в обделке микротрещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гирнис С.Р. Задача о бегущей внутри заключённого в тонкостенную обойму цилиндра нагрузке в упругом пространстве //Динамика исследования: материалы IV Межд. науч. практ. конф. – София, 2008. – Т. 28. – С. 52-57.
 2. ТУ 14-3-964-80. Тيوبинги чугунные сооружений метрополитена. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1980 – 64 с.
 3. СНиП II.23.81. Стальные конструкции. – М.: Госстрой России, 1981. – 90 с.
 4. Красников Н.Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. – Л.: Стройиздат, 1970. – 237 с.
 5. Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В. и др. Механика грунтов, основания и фундаменты. – М.: АСВ, 1994. – 527 с.
 6. Цытович М.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.
 7. СНиП 32-02-2003. Метрополитены. – Введ. 2004-01-01– М.: Госстрой России, 2004. – 25 с.
 8. СП 32-105-2004. Метрополитены. Свод правил. – М.: Госстрой России, 2004. – 252 с.
 9. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. – М.: Недра, 1989. – 270 с.
 10. Украинец В.Н. Динамика тоннелей и трубопроводов мелкого заложения под воздействием подвижных нагрузок. – Павлодар: НИЦ ПГУ им. С. Торайгырова, 2006. – 123 с.
 11. Украинец В.Н., Гирнис С.Р. Моделирование динамики тоннелей и трубопроводов глубокого заложения при действии транспортных нагрузок. – Павлодар: Кереку, 2010. – 138 с.
- Работа выполнена при поддержке гранта 0898/ГФ2, 0112РК02221 МОН РК.