

УДК 622.013.2

И.В. Баклашов, А.В. Корчак, В.В. Ковнат-Лернер

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ
В СТАЛЬНЫХ ФУТЛЯРАХ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК
В ТЕХНОЛОГИИ ПРОДАВЛИВАНИЯ**

Излагается методика определения напряжений и деформаций в стальных футлярах для прокладки водонесущих коммуникаций, сооружаемых по технологии продавливания в городских условиях.

Ключевые слова: напряжение, деформация, стальные футляры, водонесущие коммуникации

I.V. Baklashev, A.V. Korchak, V.V. Kovnat-Lerner

**THE DEFINING THE STRESS AND
THE DEFORMATION IN THE STEEL
CASES FROM THE OPERATIONAL
LOAD DURING THE BREAKINGDOWN
TECHNOLOGIES**

Methodology for stress and deformation calculations in steel covers for water pipelines, installed in city conditions using press-thru technology, is described.

Key words: stress, deformation, steel covers, water pipelines.

Принципиальное отличие условий нагружения и деформирования стальных футляров от традиционной железобетонной обделки, сооружаемой по технологии щитовой проходки, заключается в том, что технология продавливания стальных футляров обеспечивает проходку тоннелей без нарушения сплошности окружающего грунтового массива. Возникающие при проходке геомеханические процессы в грунтовом массиве развиваются только по причине малых деформаций стальных футляров при смещении контура горных выработок. Поэтому контактные

напряжения на границе стальных футляров и грунтового массива следует определять по расчетной схеме «снимаемой» с контура выработки нагрузки [1].

В конечном итоге задача, решаемая в постановке плоской деформации, сводится к составлению и решению уравнений в виде равенства смещений контуров горной выработки и стального футляра по методике, изложенной в работе [2]. Представим «снимаемую» с контура горной выработки нагрузку как сумму радиальной

$$[0,5(1+\lambda)+0,5(1-\lambda)\cos 2\theta]p$$

и касательной $[-0,5(1-\lambda)\sin 2\theta]p$

составляющих,

где p – вертикальная составляющая нагрузки в грунтовом массиве; λ – коэффициент бокового распора, который для большинства грунтов можно принять равным 0,5. Тогда из решений уравнений в смещениях, найдем равномерно распределенную по периметру стального футляра радиальную составляющую нагрузки

Таблица 1

Условный номер проекта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_1 , мм	1220	1420	1020	630	720	820	630	530	325
d , мм	10	12	10	7	8	10	8	7	7
$\frac{r}{d}$	61	59	51	45	45	41	39,4	38	23,2
k_1	1,0167	1,0172	1,0200	1,0227	1,0227	1,0250	1,0260	1,0271	1,0450
$1 + \frac{d}{r}$	1,0164	1,0170	1,0196	1,0222	1,0222	1,0244	1,0254	1,0264	1,0431
k_1^2	1,0337	1,0347	1,0404	1,0459	1,0459	1,0506	1,0527	1,0549	1,0920
$1 + 2\frac{d}{r}$	1,0328	1,0340	1,0392	1,0444	1,0444	1,0488	1,0508	1,0528	1,0861
$\frac{k_1^2 + 1}{k_1^2 - 1}$	60,35	58,64	50,50	44,57	44,57	40,52	38,95	37,43	22,74
$1 + \frac{r}{d}$	62,00	60,00	52,00	46,00	46,00	42,00	40,40	38,90	24,20

$$q = - \frac{0,75p}{\mu_1^* \frac{k_1^2 + 1}{k_1^2 - 1} - \frac{E_1^*}{E_2^*} (1 + \mu_2^*)} \quad (1)$$

$E_1^* = \frac{E_1}{1 - \mu_1^2}$, $\mu_1^* = \frac{\mu_1}{1 - \mu_1}$ – приведенные к условиям плоской деформации соответственно модуль деформации $E_1 = 2 \cdot 10^5$ МПа и коэффициент Пуассона $\mu_1 = 0,3$ стали; $E_2^* = \frac{E_2}{1 - \mu_2^2}$,

$\mu_2^* = \frac{\mu_2}{1 - \mu_2}$ – приведенная к условиям

плоской деформации соответственно модуль деформации E_2 и коэффициент Пуассона μ_2 вмещающего грунта; k_1 – геометрическая характеристика стального футляра, равная отношению наружного диаметра D_1 к внутреннему D , которую для тонкостенной конструкции стального футляра можно записать с небольшой погреш-

ностью в виде $k_1 = \frac{r+d}{r}$, где r – внутренний радиус стального футляра, d – его толщина.

Поскольку для тонкостенной конструкции стальных футляров выполняется соотношение $\frac{r}{d} \gg 1$, можно записать с небольшой погрешностью:

$$\begin{aligned} k_1 &= 1 + \frac{d}{r}; \quad k_1^2 = 1 + 2\frac{d}{r}; \\ k_1^2 - 1 &= 2\frac{d}{r}; \quad k_1^2 + 1 = 2\left(1 + \frac{d}{r}\right); \\ \frac{k_1^2 + 1}{k_1^2 - 1} &= 1 + \frac{r}{d}, \end{aligned} \quad (2)$$

о чем свидетельствуют данные в табл. 1, составленные для наиболее часто применяемых конструкций стальных футляров по проектам ООО «Институт Каналстройпроект», ранжированных по мере убывания отношения $\frac{r}{d}$, которое является безразмерной геометрической характеристикой стальных футляров.

Чтобы оценить пределы изменения нагрузки q , рассмотрим наиболее невыгодный вариант: грунтовой массив сложен крупным песком с модулем деформации $E_2=35$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu_2=0,3$; стальной футляр диаметром $D_1=1220$ мм с толщиной стенки $d=10$ мм и геометрической характеристикой $\frac{r}{d}=61$.

В результате расчетов находим:

$$q = -\frac{0,75}{1,0075} p,$$

т.е. с небольшой погрешностью для расчета стальных футляров следует принимать равномерную радиальную нагрузку

$$q = -0,75p, \quad (3)$$

безразмерная величина которой равна

$$\frac{q}{p} = -0,75.$$

Продавливание стальных футляров по технологии микротоннелирования осуществляется с нагнетанием в строительный зазор глинистого раствора, который снимает трение по боковой поверхности футляров и, следовательно, снимает касательную составляющую контактной нагрузки. В итоге неравномерно распределенная по периметру стального футляра контактная нагрузка будет иметь только радиальную составляющую, которая определяется из решения уравнений в смещениях стального футляра и вмещающего грунта в виде

$$s \cdot \cos 2\theta = \left(\frac{s}{p}\right) p \cos 2\theta \quad (4)$$

где $\frac{s}{p}$ – безразмерный параметр не- равномерной радиальной нагрузки на стальные футляры, определяемый с учетом преобразований (2) по формуле

$$\frac{s}{p} = -\frac{0,417}{0,89 \frac{r^3}{d^3} \frac{E_2^*}{E_1^*} + 1}. \quad (5)$$

Максимальные по величине сжимающие напряжения σ_θ , которые приняты отрицательными, возникают от воздействия равномерной (3) и неравномерной (4) радиальной нагрузки на внешней поверхности в шельге стального футляра.

Безразмерная величина этих напряжений определяется выражением

$$\frac{\sigma_\theta}{p} = -\left(0,75 \frac{r}{d} + 2 \frac{r^2}{d^2} \frac{0,417}{0,89 \frac{r^3}{d^3} \frac{E_2^*}{E_1^*} + 1}\right) \quad (6)$$

При этом в шельге стального футляра возникают вертикальные смещения U , вызывающие сокращение вертикального диаметра футляра, значение которых, нормированное на величину отношения $\frac{p}{E_1^*}$, определяется

выражением

$$\frac{UE_1^*}{p} = -2 \left(0,75 \frac{r}{d} + \frac{4}{3} \frac{r^3}{d^3} \frac{0,417}{0,89 \frac{r^3}{d^3} \frac{E_2^*}{E_1^*} + 1}\right) (r+d). \quad (7)$$

Ниже в таблице 2 приведены величины

$$\frac{s}{p}, \frac{\sigma_\theta}{p}, \frac{UE_1^*}{p},$$

вычисленные для грунтов с модулем деформации $E_2=10, 15, 20, 25, 30, 35$ МПа.

В результате анализа выражений (5), (6), (7) и числовых расчетов в табл. 2 можно сформулировать основные закономерности изменения основных расчетных параметров, определяющих нагрузку на стальные футляры, напряжения и деформации в стальных футлярах, в зависимости от конструкции

Таблица 2

Модуль деформации грунта E_2 , МПа	Условный номер проекта	1	2	2	10	14	2	3	5	9
	$\frac{r}{d}$	61	59	51	45	45	41	39,4	38	23,2
10	$\frac{s}{p}$	0,036	0,040	0,060	0,080	0,080	0,100	0,110	0,120	0,260
	$\frac{\sigma_\theta}{p}$	316	321	343	357	357	366	368	369	302
	$\frac{UE_L^*}{p}$, мм	13848	15801	10800	6292	7191	7699	5761	4701	1496
15	$\frac{s}{p}$	0,024	0,026	0,040	0,055	0,055	0,070	0,077	0,085	0,219
	$\frac{\sigma_\theta}{p}$	224	225	246	256	256	266	269	272	253
	$\frac{UE_L^*}{p}$, мм	9063	10345	7398	4338	4958	5406	4075	3366	1242
20	$\frac{s}{p}$	0,019	0,021	0,029	0,044	0,044	0,057	0,063	0,070	0,194
	$\frac{\sigma_\theta}{p}$	187	190	190	212	212	222	225	229	226
	$\frac{UE_L^*}{p}$, мм	7187	8368	5374	3475	3971	4424	3338	2775	1101
25	$\frac{s}{p}$	0,015	0,017	0,026	0,036	0,036	0,047	0,052	0,058	0,171
	$\frac{\sigma_\theta}{p}$	158	163	174	180	180	189	191	222	201
	$\frac{UE_L^*}{p}$, мм	5686	6786	4822	2847	3254	3653	2758	2303	971
30	$\frac{s}{p}$	0,014	0,015	0,023	0,033	0,033	0,042	0,047	0,052	0,16
	$\frac{\sigma_\theta}{p}$	150	150	158	167	167	172	175	177	190
	$\frac{UE_L^*}{p}$, мм	5310	5995	4270	2612	2985	3268	2495	2065	909
35	$\frac{s}{p}$	0,011	0,012	0,018	0,026	0,026	0,034	0,038	0,042	0,14
	$\frac{\sigma_\theta}{p}$	128	128	132	139	139	145	148	148	168
	$\frac{UE_L^*}{p}$, мм	4185	4809	3351	2062	2357	2650	2021	1671	796

футляров и деформационных свойств вмещающего грунтового массива.

Закономерности изменения безразмерного параметра неравномерной радиальной нагрузки $\frac{s}{p}$ на стальные футляры:

1) величина параметра $\frac{s}{p}$ увеличивается с уменьшением геометрической характеристики $\frac{r}{d}$, но это увеличение становится особенно значительным при $\frac{r}{d} < 40$, т.е. предпочтительно применять стальные футляры с геометрической характеристикой $\frac{r}{d} \geq 40$ или иными словами большего диаметра и с меньшей толщиной стенки, если их деформативность не ограничивает такое применение;

2) при этом с уменьшением жесткости грунтового массива, т.е. его модуля деформации E_2 , параметр $\frac{s}{p}$ увеличивается, особенно в интервале от $E_2=20$ МПа до $E_2=10$ МПа; в жестких грунтовых массивах уменьшение их жесткости от $E_2=35$ МПа до $E_2=20$ МПа приводит к менее заметному увеличению параметра $\frac{s}{p}$; поэтому предпочтительно закладывать стальные футляры в более жестких грунтовых массивах с $E_2 \geq 20$ МПа.

Закономерности изменения безразмерного параметра сжимающих напряжений $\frac{\sigma_\theta}{p}$ в шельге стального футляра:

1) сжимающие напряжения $\frac{\sigma_\theta}{p}$ увеличиваются с увеличением жесткости стальных футляров, т.е. в толстостенных стальных футлярах малого диаметра они больше и в этом смысле применение стальных футляров большого диаметра с меньшей толщиной стенки более предпочтительно, если нет ограничений по их деформативности;

2) однако уровень сжимающих напряжений $\frac{\sigma_\theta}{p}$ существенным образом зависит от жесткости окружающего грунтового массива – с уменьшением жесткости грунтового массива, т.е. его модуля деформации E_2 , особенно в интервале от $E_2=20$ МПа до $E_2=10$ МПа, сжимающие напряжения возрастают; в более жестких массивах эта зависимость менее заметна; отсюда следует очевидный вывод о целесообразности заложения стальных футляров в жестких грунтовых массивах с $E_2 \geq 20$ МПа;

3) для стальных футляров малого диаметра с $\frac{r}{d} < 40$ в жестких грунтовых массивах тенденция к увеличению сжимающих напряжений с уменьшением $\frac{r}{d}$ за исключением $D_1 = 325$ мм, представляется менее заметной, чем для стальных футляров большого диаметра; поэтому при конструировании стальных футляров большого диаметра в жестких грунтовых массивах необходимы более детальные расчеты напряжений $\frac{\sigma_\theta}{p}$.

Закономерности изменения параметра смещений стального футляра $\frac{UE_1^*}{p}$ в шельге:

1) вертикальные смещения в шельге увеличивается с уменьшением жесткости стальных футляров, т.е. с увеличением геометрической характеристики $\frac{r}{d}$, и в стальных футлярах

большого диаметра они больше, чем в стальных футлярах малого диаметра; поэтому проверка деформативности стальных футляров большого диаметра при их проектировании, помимо прочностного расчета, является обязательной, особенно при $\frac{r}{d} > 40$;

2) уменьшение жесткости окружающего грунтового массива увеличивает деформативность стальных футляров, особенно футляров большого диаметра при $\frac{r}{d} > 40$; наиболее заметно влияние грунтовых массивов с модулем деформации $E_2 \leq 20$ МПа; при $E_2 > 20$ МПа тенденция к увеличению деформативности стальных футляров с уменьшением жесткости грунтовых массивов сохраняется, но становится менее заметной; поэтому стальные футляры большого диаметра по критерию деформативности следует проектировать с $\frac{r}{d} \leq 40$, т.е. с увеличенной толщиной стенки, и в грунтовых массивах с $E_2 \geq 20$ МПа;

3) стальные футляры малого

диаметра при $\frac{r}{d} < 30$ можно проектировать в грунтовых массивах с малой жесткостью: уровень их деформативности незначительно зависит от жесткости окружающего массива.

Приведенные закономерности нагружения и деформирования стальных футляров позволяют сформулировать общие рекомендации по выбору проектных решений использования стальных футляров для прокладки подземных коммуникаций:

1) стальные футляры большого диаметра следует проектировать толстостенными с геометрической характеристикой $\frac{r}{d} \leq 40$ и толщиной стенки

$d > 10$ мм предпочтительно в жестких грунтовых массивах с модулем деформации $E_2 \geq 20$ МПа, тем самым уменьшая их деформативность, которая может оказаться определяющим критерием при расчете стальных футляров по сравнению с критерием прочности, обычно соблюдаемым с определенным запасом;

2) стальные футляры малого диаметра с $\frac{r}{d} \leq 40$, но с толщиной стенки не менее 8 мм, можно проектировать в любых грунтовых массивах, имеющих модуль деформации $E_2 \geq 10$ МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлопцов В.Г., Баклашов И.В. О постановке задач по оценке устойчивости подземных горных выработок. МГГУ, ГИАБ. №4 2006 г.

2. Баклашов И.В., Тимофеев О.В. Конструкция и расчет крепей и обделок. М., Недра, 1979. ГИАБ

Коротко об авторах

Баклашов И.В. – доктор технических наук, профессор кафедры «Физика горных пород и процессов»,

Корчак А.В. – доктор технических наук, профессор, ректор,

Ковнат-Лернер В.В. – аспирант кафедры «Строительство подземных сооружений и шахт», Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru