

**А.Н. Панкратенко, К.Х. Нгуен, А.С. Самаль,
А.Б. Бегалинов, Д.Б. Амантолов**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА
МИКРОТОННЕЛЕЙ МЕТОДОМ ПРОКОЛА
НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА И КОНСТРУКЦИЮ КРЕПИ
СУЩЕСТВУЮЩЕГО ТОННЕЛЯ**

Предложен подход к определению напряженного состояния пород вмещающего массива и оценке зоны влияния технологии строительства микротоннеля способом прокола на конструкцию крепи существующего тоннеля. В основу разработанного метода положено аналитическое решение соответствующей плоской задачи теории упругости.

Ключевые слова: строительство тоннелей, микротоннелирование, напряженно-деформированное состояние пород, конструкция крепи выработки.

Как известно для прокладки инженерных коммуникаций закрытым способом, чаще всего вначале проходят микротоннель (способом прокола или продавливания, а иногда и с использованием установок горизонтального направленного бурения), а затем уже в нем прокладывают сам трубопровод, причем иногда в качестве трубопровода используют и саму конструкцию микротоннеля. С точки зрения влияния технологии строящегося микротоннеля на породы вмещающего массива и конструкцию крепи существующего тоннеля (находящегося в зоне влияния строительства), на наш взгляд, наибольший интерес представляет технология прокола.

При технологии прокола, в грунтовый массив вдавливаются труба (или буровая штанга) имеющая конусообразный наконечник, и по мере его продвижения в грунт, происходит его уплотнение т.е. расстояния между частицами грунта уменьшаются и он становится более плотным. В этом случае вдавливание трубы в грунт происходит до тех пор пока усилие продвижения трубы не будет равно критической силе давления на грунт, а процесс сжатия грунта в пределах структурной прочности заканчивается и начинается процесс сдвига его частиц (рис. 1).

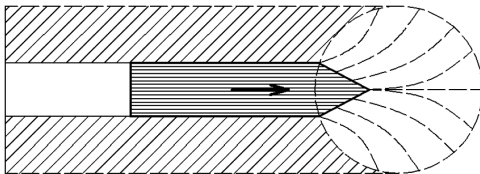


Рис. 1. Схема образования зоны влияния

Соответственно в процессе прохода выработок способом прокола в массиве возникает дополнительное напряжение, способное вызвать повреждение крепи существующих подземных сооружений, а также вызвать деформацию поверхности земли и находящихся над трассой строительства наземных сооружений (рис. 2).

Поэтому проектировщикам и строителям всегда важно знать как определить размер зоны влияния (структурно-упругих деформаций) этой технологии проходки микротоннеля, чтобы обеспечить безопасность конструкции крепи существующих подземных сооружений попадающих в зону влияния строительства нового тоннеля.

Как уже отмечалось выше, при задавливании в грунт трубы с конусным наконечником, на ее контуре возникает радиальное давление, приводящее к изменению напряженного состояния массива вокруг нее и, следовательно, напряженного состояния конструкции крепи, расположенных рядом существующих подземных сооружений. Приблизительно оценить величину радиального давления на стенки конусного наконечника, можно по схеме представленной на рис. 3.

При оценке величины радиального давления будем использовать два следующих предположения:

1) усилие, создаваемое домкратами, компенсируется только лобовым сопротивлением наконечника;

2) трение на конической поверхности наконечника отсутствует.

Погрешность, связанная с введением указанных предположений, идет в запас несущей способности обделки существующего тоннеля.

Предположим, что горизонтальное давление равномерно распределено по конической поверхности наконечника, тогда величина этого давления определяется формулой:

$$p_h = \frac{F \cos \beta}{\pi r l_1} \quad (1)$$

где p_h – горизонтальное давление; F – усилие вдавливания домкрата; β – угол заострения наконечника; r – радиус трубы; l_1 – длина наконечника.

В предположение отсутствия трения по конической поверхности лобовому давлению должно соответствовать нормальное давление p_n . Проекция нормального давления на вертикаль является радиальным давлением p_r , для определения которого может быть использована формула

$$p_r = \frac{p_h}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{F \cos \beta}{\pi r l_1 \operatorname{tg} \beta}. \quad (2)$$

Поскольку диаметр наконечника превышает диаметр основной части трубопровода, упругие напряжения, возникающие в массиве при внедрении наконечника, исчезают при его прохождении через рассматриваемое сечение. Таким образом, радиальное давление, обусловленное внедрением наконечника в грунт, и определяемое

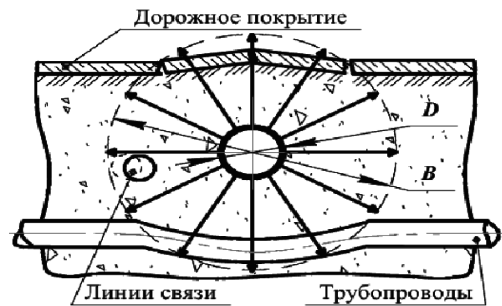


Рис. 2. Зона влияния на инженерные коммуникации и сооружения

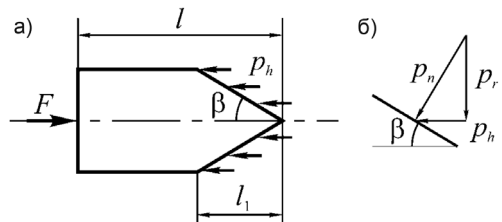


Рис. 3. Схема, используемая для оценки величины радиального давления: а) горизонтальные силы, действующие на наконечник; б) давление на коническую поверхность наконечника

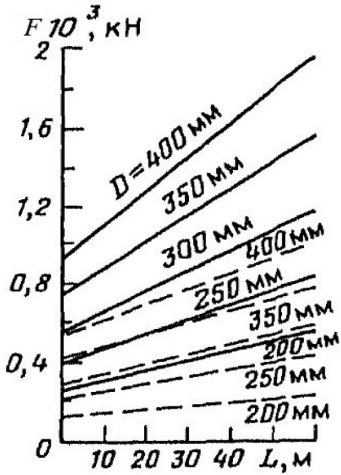


Рис. 4. График изменения напорного усилия F при статическом проколе грунта трубами в песчаных (сплошные линии) и глинистых (штриховые линии) грунтах

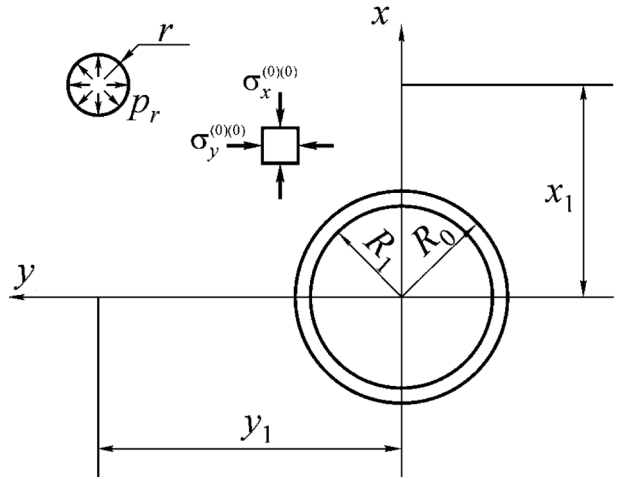


Рис. 5. Расчетная схема для определения дополнительных напряжений, вызванных технологией строительства микротоннеля методом прокола

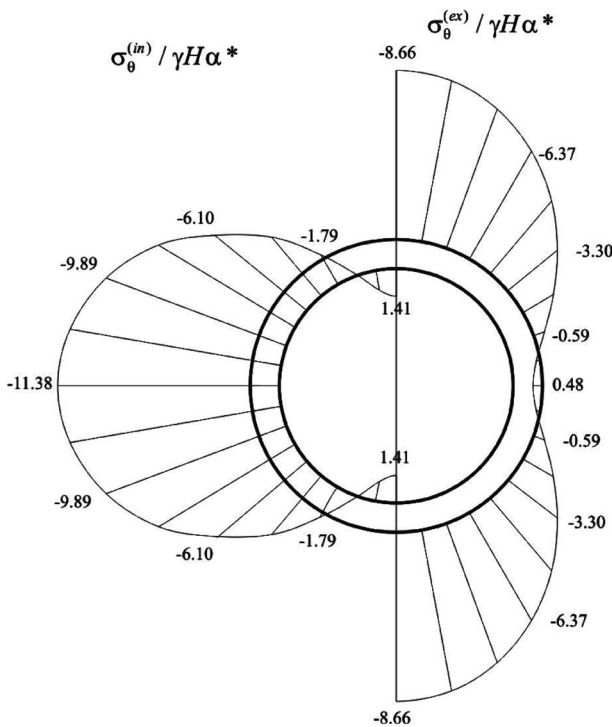


Рис. 6. Расчетные эпюры безразмерных нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем ($\sigma_{\theta}^{(in)} / \gamma H \alpha^*$) и наружном ($\sigma_{\theta}^{(ex)} / \gamma H \alpha^*$) контурах поперечного сечения конструкции крепи тоннеля

формулой (2) будет существовать лишь на небольшом участке трассы, длина которого равна длине наконечника.

На рис. 4 приведен график для определения необходимого напорного усилия при проколе труб разных диаметров на длину до 60 м в песчаных и глинистых грунтах.

Зная величину F , мы можем определить значение внутреннего давления, и в конечном итоге определить напряженное состояние массива и конструкции крепи существующего тоннеля, при проходке микротоннеля используя технологию прокола, расчетная схема которой представлена на рис. 5.

При расчете принимались следующие исходные данные: крепь тоннеля изготовлена из бетона,

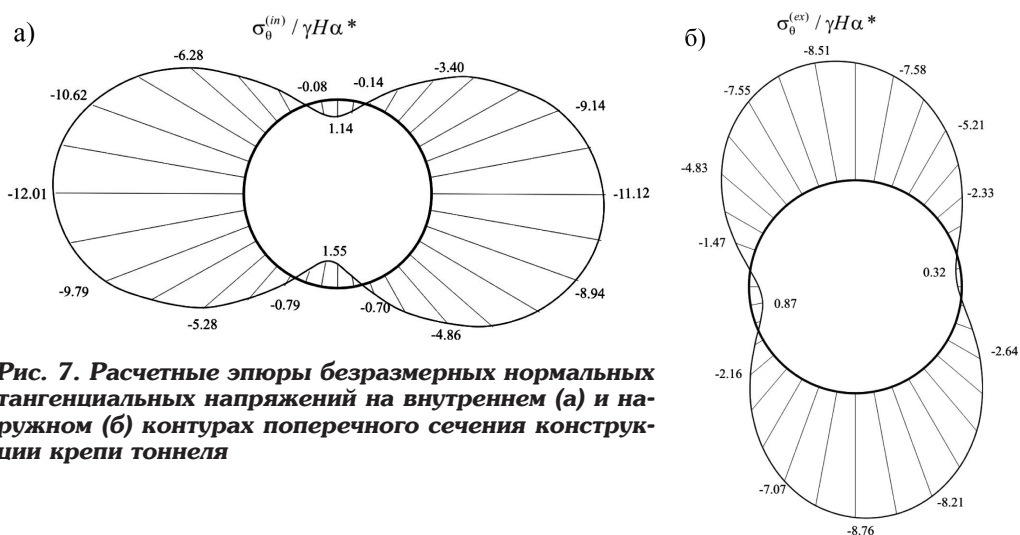


Рис. 7. Расчетные эпюры безразмерных нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем (а) и наружном (б) контурах поперечного сечения конструкции крепи тоннеля

модуль деформации которого $E_1 = 20\,000$ МПа и коэффициента Пуассона $\nu_1 = 0,2$; массив вмещающих пород представлен суглинками с усредненными значениями деформационных характеристик $E_0 = 30$ МПа, $\nu_0 = 0,35$ и коэффициентом бокового давления $\lambda = 0,8$.

С помощью алгоритмического языка FORTRAN PWS, имеющем развитый аппарат, для операций с комплексными числами, были получены следующие результаты.

На рис. 6 показано расчетные эпюры до момента проходки микротоннеля.

На рис. 7 приведены аналогичные результаты расчета рассмотренной выше подземной конструкции, но с учетом влияния новой выработки. При этом принималось, что нормальное давление, обусловленное внедрением рабочего инструмента при проколе, составляет $p = 2,2\gamma H \alpha^*$. Вследствие отсутствия симметрии каждая из эпюр дана на полном контуре поперечного сечения обделки.

Как следует из рис. 7 микротоннель, строящийся методом прокола в непосредственной близости от существующего тоннеля, может оказывать существенное влияние на напряженное состояние его крепи, которое невозможно оценить однозначно. Так, в рассмотренном случае на части внутреннего контура подземной конструкции, обращенной к вновь проводимой выработке и на противоположной ее стороне, напряжения несколько снижаются. В то же время в других частях внутреннего контура крепи наблюдается некоторый рост напряжений в обделке. На внешнем же контуре напряжения, наоборот, в части, обращенной к новой выработке и на противоположной стороне, увеличиваются, а в других частях – уменьшаются.

На напряженное состояние крепи существующего тоннеля, формирующегося при проходке новой выработки способом микротоннелирования, оказывает влияние значительное количество различных факторов, основным из которых являются относительное расстояние между центрами выработок $\rho/R_{0,0}$. С целью иллюстрации влияния расстояния между осями новой выработки и существующего тоннеля рассматривается случай, когда обе выработки располагаются на одной глубине ($x = 0$). Результаты многовариантных расчетов, выполненных с

Таблица 1

Результаты многовариантных расчетов, выполненных с целью исследования влияния параметра $\tilde{\rho} = \rho / R_{0,0}$ на экстремальные нормальные тангенциальные напряжения в крепи

$\rho = y, \text{ м}$	$\tilde{\rho}$	Безразмерные экстремальные нормальные тангенциальные напряжения $\tilde{\sigma}_0^{(экстр)}$	
		сжимающие	растягивающие
1,5	1,2	-12,562	1,829
2	1,6	-11,794	1,401
2,5	2	-11,256	1,163
3	2,4	-10,945	1,050
3,5	2,8	-10,850	1,007

использованием общих исходных данных, приведенных выше, при изменении параметра y приведены в табл. 1.

Графическая иллюстрация приведенных зависимостей показана на рис. 8. Как видно из рис. 8, при увеличении относительного расстояния $\tilde{\rho}$ между осями новой выработки и существующего тоннеля максимальные сжимающие и растягивающие нормальные тангенциальные напряжения $\sigma_{\theta}^{экс} / \alpha * \gamma H$ уменьшаются. При этом в рассмотренном диапазоне изменения снижение сжимающих напряжений не превышает 16%, а растягивающих – более 40%. При этом характер зависимостей как сжимающих, так и растягивающих напряжений в рассмотренном случае может быть аппроксимирован с высокой точностью (коэффициент корреляции $R^2 > 0,99$) функциями:

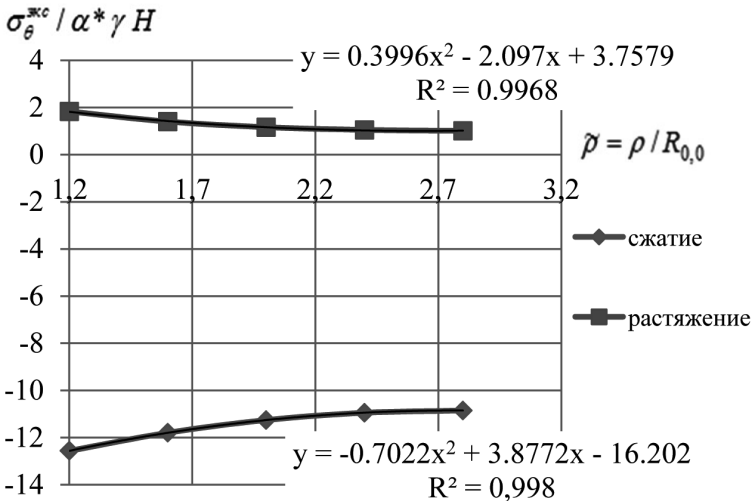


Рис. 8. Зависимости экстремальных нормальных тангенциальных напряжений в крепи существующего тоннеля с учетом новой выработки от расстояния между центрами выработок $\tilde{\rho}$

Таблица 2.

Экстремальные напряжения в крепи существующего тоннеля

$\rho = y, \text{ м}$	$\tilde{\rho}$	Экстремальные нормальные тангенциальные напряжения $\tilde{\sigma}_\theta^{(\text{экстр})}$, МПа	
		сжимающие	растягивающие
1,5	1,2	-6,02976	0,87792
2	1,6	-5,66112	0,67248
2,5	2	-5,40288	0,55824
3	2,4	-5,2536	0,504
3,5	2,8	-5,208	0,48336

- для максимальных растягивающих напряжений

$$\tilde{\sigma}_{\theta_{\max}}^{(\text{раст})} = 0,3996 \left(\frac{\rho}{R_{0,0}} \right)^2 - 2,097 \left(\frac{\rho}{R_{0,0}} \right) + 3,7579 ;$$

- для максимальных сжимающих напряжений

$$\tilde{\sigma}_{\theta_{\max}}^{(\text{с})} = -0,7022 \left(\frac{\rho}{R_{0,0}} \right)^2 + 3,8772 \left(\frac{\rho}{R_{0,0}} \right) - 16,202 .$$

Умножив напряжения в табл. 1 на величину $\gamma H \alpha^* = 0,48$, получим данные, приведенные в табл. 2.

Построенные зависимости представляют практическую ценность. Так, если крепь существующего тоннеля выполнена из бетона В15 ($E_6 = 23\,000$ МПа, $R_b = 8,5$ МПа и $R_{bz} = 0,75$ МПа) в породах, деформационные свойства которых характеризуются модулем деформации $E_{0,0} = 34$ МПа при $\gamma H \alpha^* = 0,48$ МПа, для обеспечения условия

$$\left| \tilde{\sigma}_\theta^{(\text{экстр})} \right| \gamma H \alpha^* \leq \begin{cases} R_b & \text{при сжатии} \\ R_{bt} & \text{при растяжении} \end{cases}$$

должно выполняться $\tilde{\rho} \geq 1,5$. В рассмотренном примере, когда радиус существующего тоннеля $R_{0,0} = 1,25$ м, расстояние между осями новой выработкой и существующего тоннеля должно удовлетворять условию $\rho = y \geq 1,9$ м.

Вывод

В заключении можно отметить, что при строительстве выработок методом прокола, принятая технология существенно влияет на напряженно-деформированное состояние массива и конструкцию крепи близко расположенной существующей выработки.

Приведенный метод расчета можно использовать для оценки зоны влияния и определения безопасного расстояния места расположения трассы проектируемого микротоннели в зависимости от радиусов строящегося и существующего тоннелей, характеристик свойств массива вмещающих пород и материала конструкции крепи существующего тоннеля.

1. Бульчев Н.С. Механика подземных сооружений: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Недра, 1994. – 382 с.
2. Родин И.В. Снимаемая нагрузка и горное давление / Исследование горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1960. – С. 343–374.
3. Фотиева Н.Н., Козлов А.Н. Расчет крепи параллельных выработок в сейсмических районах. – М.: Недра, 1992. – 231 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Панкратенко А.Н.¹ – доктор технических наук, профессор,
Нгуен К.Х.¹ – аспирант, e-mail: quanghai170687@gmail.com,
Самаль А.С. – доктор технических наук, профессор,
Тульский государственный университет,
Бегалинов А.Б.² – профессор,
Амантолов Д.Б.² – аспирант,
¹ МГИ НИТУ «МИСиС»,
² КазНТУ им К.Н.Сатпаева, Казахстан.

UDC 622.261; 622.831

MATHEMATICAL MODELING OF INFLUENCE OF MICROTUNNELING BY PUNCHING ON STRESS STATE OF ENCLOSING ROCK MASS AND ON SUPPORT OF EXISTING TUNNEL

Pankratenko A.N.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Nguyen Quang Huy¹, Graduate Student, e-mail: quanghai170687@gmail.com,
Samal' A.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Tula State University, Tula, Russia,
Begalinov A.B.², Professor,
Amantolov D.B.², Graduate Student
¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru,
² Kazakh National Technical University named after K.I. Satpayev,
050013, Almaty, Kazakhstan, e-mail: allnt@ntu.kz.

An approach to the prediction of stress state and assessing the strength of a circular tunnel lining and the surrounding rock mass under construction near the production used by the micro-tunneling technology. The basis of this method is necessary analytical solution of the corresponding plane problem of elasticity theory.

Key words: tunnel construction, microtunneling, stress strain state of rocks lining tunnel.

REFERENCES

1. Bulychev N.S. *Mekhanika podzemnykh sooruzheniy: uchebnik dlya vuzov, 2-e izd.* (Mechanics of underground structures, Textbook for high schools, 2nd edition), Moscow, Nedra, 1994, 382 p.
2. Rodin I.V. *Issledovanie gornogo davleniya* (Study of rock pressure), Moscow, Gosgortekhizdat, 1960, pp. 343–374.
3. Fotieva N.N., Kozlov A.N. *Raschet крепи parallel'nykh vyrabotok v seysmicheskikh rayonakh* (Calculation lining parallel expression botok in seismic regions), Moscow, Nedra, 1992, 231 p.

