

УДК 69.035

**И.В. Баклашов, А.В. Корчак, Т.О. Дудченко,  
А.А. Скворцов**

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ  
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ**

*Рассмотрены расчетные схемы и алгоритм определения деформированного состояния трубопроводов при подработке.*

*Ключевые слова: трубопровод, грунтовый массив, деформированное состояние, смещения, деформации.*

---

**И**нженерные водонесущие коммуникации (канализация, водопровод, водосток) являются жизнеобеспечивающими системами современного городского хозяйства. На сегодняшний день около половины водонесущих коммуникаций г.Москвы практически исчерпали нормативный срок службы. На фоне активно развивающегося подземного строительства в г. Москве эксплуатационное состояние водонесущих коммуникаций осложняется ещё в большей степени. В последние годы были зафиксированы неоднократные случаи аварийных ситуаций на водопроводных и канализационных сетях, которые расположены выше строящихся коллекторных тоннелей или вблизи глубоких котлованов, т.е. в подрабатываемых грунтовых массивах. В связи с этим возникает необходимость в прогнозировании воздействия подземного городского строительства на сохранность трубопроводов и разработки мероприятий по их защите на стадии проектирования.

В данной работе выполнено геомеханическое обоснование деформи-

рованного состояния канализационных трубопроводов под воздействием строящихся коллекторных тоннелей. На первом этапе исследований в результате компьютерного моделирования различных геомеханических ситуаций численными методами конечных элементов выполнен анализ деформированного состояния подработанных грунтовых массивов, вмещающих трубопроводы [1, 2]. Расчётная схема моделирования представлена на рис. 1, где приняты следующие обозначения и размерности:

$D$  – диаметр подрабатывающей выработки, м;  $u$  – удвоенная величина строительного зазора между выработкой и её обделкой с коэффициентом запаса 1,2, м;  $A_0, A_n$  – размеры полумульды сдвижений грунтового массива соответственно на уровне шельги выработки и на горизонте заложения трубопровода, м;  $h, H$  – расстояние от шельги выработки соответственно до горизонта заложения трубопровода и до земной поверхности, м;  $\delta$  – граничный угол сдвижений грунтового массива при подработке, измеряемый как внешний угол относительно

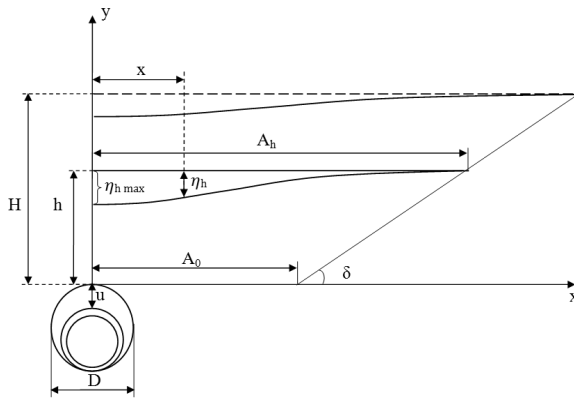


Рис. 1. Расчетная схема

горизонтальной оси  $x$  с началом координат в шельги выработки, град.;  $\eta_{h\max}$  – максимальное вертикальное смещение слоя грунтового массива на горизонте  $h$  над выработкой, м;  $\eta_h$  – вертикальное смещение слоя грунтового массива на горизонте  $h$  в сечении с координатой  $x$ , м.

Механические свойства грунтов определены следующими параметрами:  $\gamma$  – удельный вес,  $\text{kH/m}^3$ ;  $\varphi$  – угол внутреннего трения, град.;  $c$  – сцепление, МПа;  $E$  – модуль деформации, МПа;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

В результате моделирования большого массива геомеханических ситуаций и последующего регрессионного анализа определены аппроксимирующие расчётные выражения для геометрических параметров мульды сдвижений ( $\delta$ ,  $A_0$ ,  $A_h$ ) и параметров деформированного состояния грунтового массива на глубине заложения трубопровода.

Граничный угол сдвижения  $\delta$  определён в зависимости от угла внутреннего трения  $\varphi$ , который для грунтов от глины до песка изменяется в интервале от  $20^\circ$  до  $30^\circ$ , и представ-

лен в табл. 1, что удовлетворительно согласуется с рекомендациями [3].

Размеры полумульды сдвижений:

$$A_0 = \frac{5000uD}{D+2000u}, \text{ м}; \quad (1)$$

$$A_h = A_0 + hctg\delta, \text{ м}. \quad (2)$$

Параметры деформированного состояния слоя грунтового массива на горизонте заложения трубопровода  $h$ :

максимальные вертикальные смещения

$$\eta_{h\max} = \frac{u}{1+0,42\left(\frac{H}{D}\right)^{1,2}} \cdot \left(\frac{H}{h}\right)^{0,4}, \text{ м},$$

где  $H > h > 1\text{ м}$ ; (3)

распределение вертикальных смещений в пределах мульды сдвижений

$$\eta_h = \eta_{h\max} \cdot S(z), \text{ м}; \quad (4)$$

распределение наклонов

$$i_h = \frac{\eta_{h\max}}{A_h} \cdot S'(z); \quad (5)$$

распределение кривизны

$$k_h = \frac{\eta_{h\max}}{A_h^2} \cdot S''(z), \text{ м}^{-1}; \quad (6)$$

распределение горизонтальных смещений

$$u_h = k_i \cdot F(z), \text{ м}; \quad (7)$$

$$\text{где } k_u = -0,075u \left( e^{-0,3h} + 1,52 \frac{D}{H} \right), \text{ (м)},$$

если  $0 < h < 0,55H$ ,

$$k_u = -0,15u \frac{D}{H} \left[ \left( \frac{h}{H} \right)^5 - 0,76 \right], \text{ (м)},$$

если  $0,55H < h < H$ ;

распределение горизонтальных деформаций

Таблица 1

|                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $\delta$ , град.  | 59 | 56 | 54 | 52 | 50 | 48 | 47 | 45 | 44 | 43 | 41 |
| $\varphi$ , град. | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |

Таблица 2

| $z = \frac{x}{A_h}$ | S(z)  | S'(z) | S''(z) | F(z) | F'(z) |
|---------------------|-------|-------|--------|------|-------|
| 0                   | 1     | 0     | 0      | 0    | -10,0 |
| 0,05                | 0,98  | -0,80 | -10,20 | 0,45 | -9,0  |
| 0,10                | 0,93  | -1,20 | -7,20  | 0,90 | -7,5  |
| 0,15                | 0,86  | -1,50 | -5,10  | 1,20 | -6,0  |
| 0,20                | 0,78  | -1,70 | -3,20  | 1,50 | -5,0  |
| 0,25                | 0,69  | -1,80 | -1,60  | 1,70 | -3,3  |
| 0,30                | 0,60  | -1,90 | -0,10  | 1,83 | -1,80 |
| 0,40                | 0,42  | -1,70 | 2,30   | 1,90 | 0,15  |
| 0,50                | 0,26  | -1,40 | 3,90   | 1,80 | 2,10  |
| 0,60                | 0,13  | -1,00 | 4,40   | 1,48 | 3,50  |
| 0,70                | 0,05  | -0,60 | 4,00   | 1,10 | 3,65  |
| 0,80                | 0,02  | -0,20 | 2,80   | 0,75 | 3,75  |
| 0,90                | 0,005 | -0,10 | 1,20   | 0,35 | 1,75  |
| 1,0                 | 0     | 0     | 0      | 0    | 0     |

$$\varepsilon_h = k_{\varepsilon} F'(z), \quad (8)$$

где  $k_{\varepsilon} = 0,65 \cdot \left(\frac{u}{D}\right) \cdot \left(\frac{D}{H}\right)^{1,7} \cdot (e^{-0,3h} + 0,07)$ ,

если  $0 < h < 0,75H$ ,

$$k_{\varepsilon} = 0,05 \cdot \left(\frac{u}{D}\right) \cdot \left(\frac{D}{H}\right)^{1,7} \cdot \left(1 + \left(\frac{h}{H}\right)^5\right),$$

если  $0,75H < h < H$ ,

S(z), F(z), S'(z), S''(z), F'(z) - функции распределения вертикальных и горизонтальных смещений или типовые функции безразмерной координаты

$z = \frac{x}{A_h}$  и их производные, представ-

ленные в табличной форме (табл. 2).

В качестве иллюстрации сходимости результатов компьютерного моделирования и расчетов по аппроксимирующим зависимостям (3)-(8) на рис. 2 представлена зависимость

$\eta_{h_{\max}}$  от h, построенная по результатам моделирования – пунктирная линия и расчетов по формуле (3) – сплошная линия, а на рис. 3, 4, 5, 6, 7 показано распределение соответствующих параметров деформированного состояния грунта  $\eta_h(z)$ ,  $i_h(z)$ ,  $k_{,h}(z)$ ,  $u_h(z)$ ,  $\varepsilon_h(z)$  при  $u = 0,02$  м,  $D = 4$  м,  $H$

= 16 м, h = 8 м, где результаты моделирования – пунктирные линии, расчёта – сплошные линии.

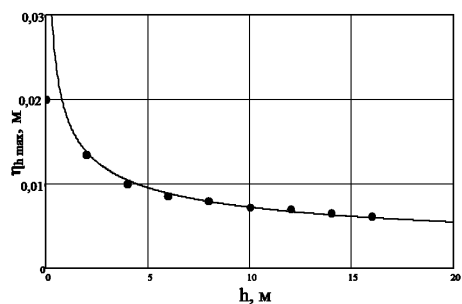
На втором этапе исследований выполнена оценка влияния конструктивной жёсткости трубопроводов (жёсткости самих труб, их оснований и сопряжений с колодцами) на деформированное состояние подрабатываемых грунтовых массивов.

Трубы самотёчной канализации, имеющие, как правило, податливое раструбное соединение секций, обладают малой изгибной жёсткостью EI не более  $10^4$  кН·м<sup>2</sup>, где E – модуль деформации материала труб (кН/м<sup>2</sup>), I – момент инерции поперечного сечения (м<sup>4</sup>).

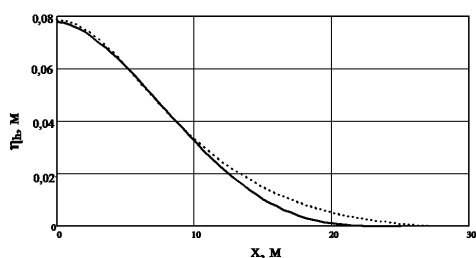
Трубы напорной канализации, имеющие более жёсткие сопряжения секций (чугунные и железобетонные) или бессекционные сварные (стальные), обладают значительной изгибной жёсткостью, которую можно оценить по формуле

$$EI = E \frac{\pi t d^3}{8}, \text{ МПа} \cdot \text{м}^4, \quad (9)$$

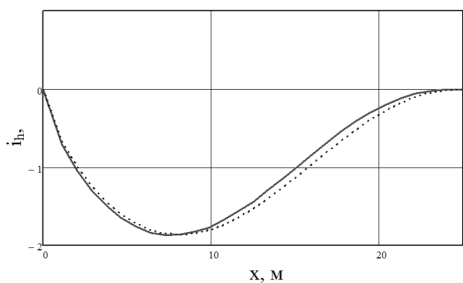
где t – толщина стенки, м; d – наружный диаметр, м и которая определена для труб с максимальным диаметром и приведена в табл. 3.



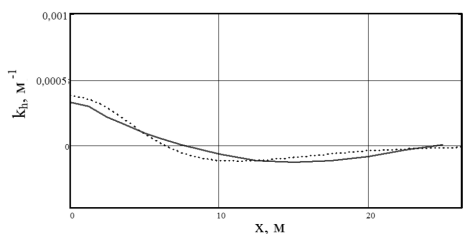
**Рис. 2**



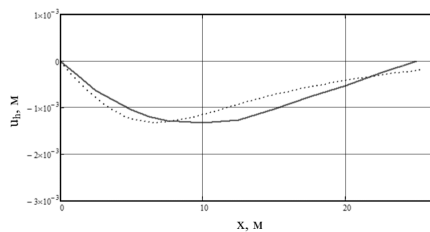
**Рис. 3**



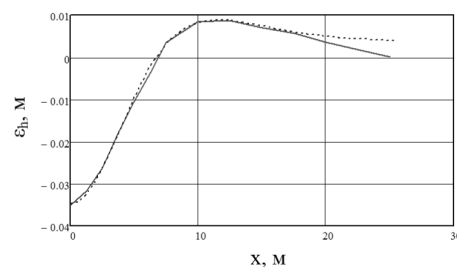
**Рис. 4**



**Рис. 5**



**Рис. 6**



**Рис. 7**

В последнем столбце таблицы 3 указана приведенная толщина плиты  $h$  шириной 1 м, изгибная жёсткость которой равна жёсткости трубопровода (эквивалент трубопровода):

$$h = 1,67d\sqrt[3]{t}. \quad (10)$$

Анализ конструктивных решений оснований трубопроводов показывает, что их можно условно подразделить по изгибной жёсткости на четыре основных вида по расчётному модулю деформации  $E$  (табл. 4), где приведена изгибная жёсткость их эквивалента в виде плиты шириной 1 м и толщиной 0,5 м.

Трубы напорной канализации укладываются также в тоннели, сооружаемые по технологии щитовой проходки, микротоннелированием или продавливанием стальных футляров. Конструкция сопряжений элементов обделки тоннелей при щитовой проходке и микротоннелировании не обеспечивает необходимую изгибную

Таблица 3

| Материал труб  | Модуль деформации E, МПа | Геометрические параметры d×t, м | Момент инерции I, м <sup>4</sup> | Изгибная жёсткость EI, МПа·м <sup>4</sup> | Приведенная толщина плиты h, м |
|----------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|--------------------------------|
| Стальные       | 200000                   | 1×0,01                          | 0,004                            | 800                                       | 0,365                          |
| Чугунные       | 200000                   | 1×0,025                         | 0,01                             | 2000                                      | 0,494                          |
| Железобетонные | 20000                    | 0,682×0,046                     | 0,006                            | 120                                       | 0,412                          |

Таблица 4

| Вид основания трубопровода | Расчётный модуль деформации E, кН/м <sup>2</sup> | Момент инерции I, м <sup>4</sup> | Изгибная жёсткость EI, кН·м <sup>2</sup> |
|----------------------------|--|----------------------------------|--|
| Грунт                      | 2·10 <sup>4</sup>                                | 0,01                             | 2·10 <sup>2</sup>                        |
| Укреплённый грунт          | 2·10 <sup>5</sup>                                | 0,01                             | 2·10 <sup>3</sup>                        |
| Бетонное                   | 2·10 <sup>6</sup>                                | 0,01                             | 2·10 <sup>4</sup>                        |
| Железобетонное             | 2·10 <sup>7</sup>                                | 0,01                             | 2·10 <sup>5</sup>                        |

жёсткость тоннельной конструкции в целом, которая по приближённым оценкам составляет не более  $2,5 \cdot 10^5$  кН·м<sup>2</sup>. Изгибная жёсткость стального футляра может составлять  $2,5 \cdot 10^6$  кН·м<sup>2</sup>.

Таким образом, максимальная изгибная жёсткость конструкций трубопроводов не превышает  $EI=2,5 \cdot 10^6$  кН·м<sup>2</sup>, откуда следует, что при замене конструкции трубопровода эквивалентной плитой шириной  $b = 1$  м и высотой  $h=0,5$  м её модуль деформации не будет превышать  $240 \cdot 10^6$  кН/м<sup>2</sup>.

Для оценки влияния конструктивной жёсткости трубопровода на деформированное состояние подрабатываемого грунтового массива выполнено компьютерное моделирование трёхмерной задачи, где конструкция трубопровода была заменена эквивалентной плитой с модулем деформации  $E=240 \cdot 10^6$  кН/м<sup>2</sup>. В результате моделирования установлено, что такая конструктивная жёсткость уменьшает максимальные вертикальные смещения грунтового массива на горизонте заложения не более, чем на 10%. Таким образом, принимая деформированное состояние трубопроводов по деформированному состоя-

нию грунтового массива, т.е. без учёта конструктивной жёсткости трубопроводов, будем допускать погрешность не более 10% в сторону завышения деформаций трубопроводов или в «запас прочности» последних.

Если в зону подработки попадают колодцы, жёсткость их сопряжения с трубопроводами оказывает существенное влияние, и пренебрегать влиянием этой конструктивной жёсткости в расчётах не следует. Для оценки этого влияния рассмотрим две расчётные схемы: первая – трубопровод жёстко заделан в стенку колодца (сопряжение не нарушено); вторая – трубопровод шарнирно сопряжён со стенкой колодца (сопряжение нарушено).

По первой расчётной схеме параметры деформированного состояния трубопровода в пределах полумульды сдвижений, включающей колодец:

$$\text{распределение вертикальных смещений} \\ \eta_h = \eta_{h_{\max}} [(1-k)T(z) + k], \quad (11)$$

$$\text{где } k = \left[ 1 - \left( \frac{L}{A_h} \right)^{1,8} \right]^{2,2} \quad (12)$$

Таблица 5

| $z = \frac{x}{L}$ | <b>T(z)</b> | <b>T'(z)</b> | <b>T''(z)</b> | <b>B(z)</b> | <b>B'(z)</b> | <b>B''(z)</b> |
|-------------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| 0                 | 1           | 0            | 0             | 1           | 0            | 0             |
| 0,05              | 0,996       | -0,163       | -3,535        | 0,90        | -1,05        | -9,69         |
| 0,10              | 0,983       | -0,347       | -3,717        | 0,90        | -1,41        | -5,55         |
| 0,15              | 0,960       | -0,536       | -3,734        | 0,83        | -1,60        | -3,20         |
| 0,20              | 0,930       | -0,723       | -3,637        | 0,74        | -1,75        | -1,54         |
| 0,25              | 0,890       | -0,903       | -3,452        | ,065        | -1,79        | -0,20         |
| 0,30              | 0,839       | -1,070       | -3,166        | 0,56        | -1,70        | 0,88          |
| 0,40              | 0,718       | -1,354       | -1,845        | 0,39        | -1,60        | 2,47          |
| 0,50              | 0,573       | -1,537       | -1,180        | 0,35        | -1,30        | 3,39          |
| 0,60              | 0,415       | -1,586       | 0,302         | 0,14        | -0,94        | 3,71          |
| 0,70              | 0,260       | -1,472       | 2,073         | 0,06        | -0,58        | 3,44          |
| 0,80              | 0,127       | -1,170       | 4,067         | 0,02        | -0,27        | 2,63          |
| 0,90              | 0,033       | -0,660       | 6,790         | 0,002       | -0,066       | 1,38          |
| 1,0               | 0           | 0            | 0             | 0           | 0            | 0             |

представляет функцию влияния колодца, находящегося на расстоянии по горизонтали  $L$  от оси подрабатывающей выработки;

распределение наклонов

$$i_h = \frac{\eta_{h_{\max}}}{A_h} (1-k) T'(z); \quad (13)$$

распределение кривизны

$$k_h = \frac{\eta_{h_{\max}}}{A_h^2} (1-k) T''(z), \quad (14)$$

$T(z)$ ,  $T'(z)$ ,  $T''(z)$  – функции безразмерной координаты  $z = \frac{x}{L}$  и их производные, представленные в табличной

форме (табл. 3). Распределение параметров деформированного состояния в пределах полумульды сдвижений, не включающей колодец, определяется по формулам (4)-(8).

По второй расчётной схеме параметры деформированного состояния трубопровода в пределах полумульды сдвижений, включающей колодец:

распределение вертикальных смещений

$$\eta_h = \eta_{h_{\max}} \cdot B(z); \quad (15)$$

распределение наклонов

$$i_h = \frac{\eta_{h_{\max}}}{A_h} B'(z); \quad (16)$$

распределение кривизны

$$k_h = \frac{\eta_{h_{\max}}}{A_h^2} B''(z); \quad (17)$$

$B(z)$ ,  $B'(z)$ ,  $B''(z)$  – функции безразмерной координаты  $z = \frac{x}{L}$  и их про-

изводные, представленные в табличной форме (табл. 5). Распределение параметров деформированного состояния в пределах полумульды сдвижений, не включающей колодец, определяется по формулам (4)-(8).

Горизонтальные смещения  $u_h$  и деформации  $\epsilon_h$  с учётом влияния колодцев, которые при подработке не смещаются в горизонтальном направлении, можно по результатам моделирования считать равными нулю независимо от расчётной схемы.

На заключительном этапе исследования построены расчётные выражения для прогнозирования возможности наступления предельных состояний подрабатываемых трубопроводов. Для напорных безсекционных трубопроводов следует рассматривать наступление предельных состояний первой группы [4], т.е. из условия прочности по возникающим от подработки нормальным осевым напря-

жением в поперечных сечениях трубопроводов:

$$\sigma = E(\epsilon_h \pm k_h \frac{d}{2}), \quad (18)$$

где  $E$  - модуль деформации материала трубопровода;  $\epsilon_h$  - горизонтальная деформация трубопровода;  $k_h$  - кривизна трубопровода;  $d$  - наружный диаметр трубопровода; знак «плюс» принимается при расчёте напряжений на растянутом волокне, знак «минус» - на сжатом волокне поперечного сечения.

Для самотёчных секционных трубопроводов следует рассматривать наступление предельных состояний второй группы, т.е. из условия появ-

ления недопустимых линейных перемещений

$$s = l \left( \epsilon_h + k_h \frac{d}{2} \right) \quad (19)$$

и недопустимых угловых перемещений в стыках между секциями трубопроводов

$$\alpha = k_h \frac{180 \cdot l}{\pi}, \quad (20)$$

где  $l$  - длина секции трубопровода.

Расчёт по предельным состояниям следует выполнять с учётом воздействия на трубопроводы других силовых факторов, помимо воздействия подработки, которое исследовано в настоящей работе.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаев О.Н., Боков И.А.* Математическое моделирование влияния проходки инженерного тоннеля с пресс-бетонной отделкой в г.Москве с использованием ПК Plaxis // сб. научных трудов НИИОСП. - М., 2006.

2. *Баклашов И.В., Скворцов А.А., Мукаев И.Р.* Определение параметров мульды сдвига грунта массива при подра-

ботке его строящимся тоннелем. // ГИАБ № 2, МГУ, М., 2011 г.

3. *Инструкция* по наблюдению за сдвижением земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений. ИПКОН, М., 1997.

4. *Баклашов И.В., Картозия Б.А.* Механика подземных сооружений и конструкций крепей. М., Недра, 1982. **ГИАБ**

---

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Баклашов Игорь Владимирович* - доктор технических наук, профессор,

*Корчак Андрей Владимирович* - доктор технических наук, профессор, ректор,

*Дудченко Тимур Олегович* - аспирант,

*Скворцов Алексей Александрович* - аспирант,

Московский государственный горный университет,

Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru

