

УДК 624.1

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-114-133](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-114-133)

EDN WEEFBJ

# ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

О.Н. ИСАЕВ<sup>✉</sup>, канд. техн. наук  
Д.П. КУЗНЕЦОВА

*Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация*

## Аннотация

*Введение.* Для оценки влияния подработки на деформации оснований и изменение усилий в конструкциях существующих и проектируемых трубопроводов используются различные (эмпирические, аналитические, численные) методы расчета. Эмпирические методы разработаны на основе опытного анализа многочисленных результатов инженерно-геодезических наблюдений за осадками и сдвигами поверхности земли на подрабатываемых территориях. Их недостатком является то, что они в полной мере не учитывают разнообразие факторов, влияющих на осадки и сдвиги при проходке подземной выработки, – неоднородность разрезов, физико-механические свойства грунтов и др.

*Целью* данной работы является определение преимуществ численного метода и разработка методики использования численных расчетов в геотехнических программных комплексах Plaxis, Midas GTS NX. В отличие от эмпирических и аналитических, численные методы моделируют неоднородность залегания инженерно-геологических элементов и их физико-механические свойства, выполняют совместные расчеты системы «подземная выработка – грунтовый массив – существующее сооружение», учитывают поэтапность и технологию подработки, дают возможность за короткий промежуток времени просчитать большое количество вариантов. Данный факт дает большое преимущество этому методу расчетов. В статье рассмотрены принципы численного расчета прочности магистральных газопроводов при устройстве закрытых подземных выработок с целью выемки полезных ископаемых.

*Методика* основана на исследовании степени и характера влияния различных факторов на результаты численного моделирования: включения трубопровода в расчетную модель; ширины расчетной области модели; размеров сетки конечных элементов; параметров геомеханической модели грунта; ширины, глубины заложения, угла наклона, мощности и числа подрабатываемых пластов полезных ископаемых; постановки задачи (2D или 3D).

*Результаты* представлены в виде верификации методики, выполненной на основе сравнений расчетных и фактических параметров сдвига горных пород.

*Вывод.* Методика достоверно прогнозирует деформации оснований и изменение усилий в конструкциях существующих и проектируемых трубопроводов при разработке пласта угля на одной из шахт подмосковного угольного бассейна.

**Ключевые слова:** подрабатываемая территория, горные выработки, численные методы, прочность, магистральный газопровод, деформации

**Для цитирования:** Исаев О.Н., Кузнецова Д.П. Численный расчет на прочность подземных газопроводов на подрабатываемых территориях. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022;34(3):114–133. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-114-133](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-114-133)

**Вклад авторов**

Каждый из авторов в равной степени принимал участие в исследовании данной тематики.

**Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.05.2022

Поступила после рецензирования 04.07.2022

Принята к публикации 16.08.2022

# NUMERICAL STRENGTH CALCULATIONS OF UNDERGROUND GAS PIPELINES IN UNDERMINING AREAS

O.N. ISAEV<sup>✉</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

D.P. KUZNETSOVA

*Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov,  
JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation*

**Abstract**

*Introduction.* Various calculation methods, including empirical, analytical, and numerical ones, are used to assess the effect of undermining on base deformations and force variations in the structures of existing and projected pipelines. Empirical methods are typically developed using an experimental analysis of numerous results obtained during the engineering and geodetic observations of settlements and surface terrain shifts in undermining areas. However, such methods fail to take into account all the factors affecting settlements and shifts during underground excavations, including the vertical heterogeneity and physicomaterial properties of soils, etc.

*Aim.* To determine the advantages of numerical methods and to develop a methodology for using numerical calculations in the Plaxis and Midas GTS NX geotechnical software applications. Compared to empirical and analytical methods, numerical approaches have the advantage of simulating the bedding heterogeneity of geological engineering elements and their physicomaterial properties, ensuring joint calculations of the “underground excavation – soil massif – existing structure” system, considering the gradual character and undermining technology, as well as providing the possibility to search through a large quantity of variants over a short period of time. The principles of numerical calculations of the strength of underground main gas pipelines during the arrangement of closed underground excavations for mineral mining are considered.

*Methods.* The developed methodology is based on the degree and nature of effects produced by various factors on numerical modeling results, including the presence of a pipeline in the design model, width of the model calculated area, finite element mesh sizes, parameters of the soil geomechanical model, width, bedding depth, dip angle, thickness, and number of mineral mined formations, as well as the problem statement type (2D or 3D).

*Results.* The results of the study are presented in the form of a methodological verification, performed on the basis of a comparison between the calculated and actual parameters of rock shifts.

*Conclusions.* The presented methodology reliably predicts base deformations and force variations in the structures of existing and projected pipelines during the excavation of a coal seam at one of the mines of the Moscow lignite basin.

**Keywords:** undermining area, mine excavations, numerical methods, strength, main gas pipeline, deformations

**For citation:** Isaev O.N., Kuznetsova D.P. Numerical strength calculations of underground gas pipelines in undermining areas. *Bulletin of Science and Research Center of Construction.* 2022;34(3):114–133. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-114-133](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-114-133)

#### **Author contribution statements**

The authors have made an equal contribution to the conducted research.

#### **Funding**

No funding support was obtained for the research.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 13.05.2022*

*Revised 04.07.2022*

*Accepted 16.08.2022*

## **Введение**

Магистральные газопроводы, согласно ГОСТ 27751-2014 [1], являются объектами повышенной ответственности, строить и использовать которые можно только в соответствии со специальными нормами и инструкциями, регламентирующими их проектирование, строительство и эксплуатацию, особенно на подрабатываемых территориях [2, 3].

Для оценки влияния подработки на деформации оснований и изменение усилий в конструкциях существующих и проектируемых трубопроводов могут использоваться различные (эмпирические, аналитические, численные) методы расчета.

В предыдущие годы наибольшее распространение получили эмпирические методы. Они нашли отражение в нормах на проектирование магистральных газопроводов – СП 36.13330.2012 «СНиП 2.05.06-85\* Магистральные газопроводы», ГОСТ Р 55989-2014 «Магистральные газопроводы. Нормы проектирования на давление свыше 10 МПа. Основные требования».

Эмпирические методы расчета разработаны на основе анализа результатов многочисленных инженерно-геодезических наблюдений за осадками и сдвигами поверхности земли на подрабатываемых территориях. Влияние от подработки в них задается как внешнее воздействие в виде перемещений грунтового массива в пределах мульды сдвига. Недостатком эмпирических методов является то, что они не в полной мере учитывают разнообразие факторов, влияющих на осадки и сдвиги при проходке подземной выработки – неоднородность разрезов, физико-механические свойства грунтов и др.

В последние годы активно развиваются численные методы расчета (метод конечных элементов и др.). Они получили широкое распространение за последние два десятилетия в связи с бурным развитием вычислительной техники и программных комплексов, позволяющих решать геотехнические задачи любой сложности. В отличие от эмпирических

и аналитических, численные методы позволяют учитывать неоднородность залегания инженерно-геологических элементов и их физико-механические свойства, выполнять совместные расчеты системы «подземная выработка – грунтовый массив – существующее сооружение», учитывать поэтапность и технологию подработки. Дают возможность за короткий промежуток времени просчитывать большое количество вариантов.

Особенностью геотехнических программных комплексов, используемых при реализации численных методов, является часто возникающая многовариантность и неопределенность при выборе ряда расчетных параметров создаваемой модели объекта (размеры расчетной области, вид и параметры модели грунта, способ моделирования воздействия, виды и значения интерфейсных элементов и др.). Назначение этих параметров обусловлено лишь спецификой процесса моделирования, информация о них не содержится в исходной проектной документации. Нормативно-рекомендательные документы по этому вопросу также часто отсутствуют. Инструкции по пользованию соответствующими расчетными программами, хотя и содержат много полезной информации, однако часть важных для практических расчетов вопросов не рассматривают. Все эти особенности относятся и к моделированию подработки магистральных газопроводов.

Использование численных методов для оценки влияния подработки на существующие здания и сооружения изучались в основном для проходки тоннелей с использованием ТПМК. Результаты исследований нашли свое отражение в работах О.А. Богомоловой, А.В. Жиделева, В.А. Ильичева, О.Н. Исаева, Лонжида Эхтура, Н.С. Никифоровой, В.П. Петрухина, А.Н. Пушилина, Л.А. Строковой, М.М. Тупикова, А.В. Фаворова, Р.Ф. Шарафутдинова, В.И. Шейнина и др. [8, 9, 11, 13–15, 17–20]. Для подработки, выполняемой с целью выемки полезных ископаемых, подобные исследования фактически не выполнялись.

В данной статье представлены результаты исследований по разработке методики численного расчета магистральных газопроводов, подрабатываемых горными выработками при разработке полезных ископаемых. Статья разделена и публикуется в двух частях.

## Методика выполнения исследований

При разработке основных положений методики численных расчетов в качестве откликов рассматривались следующие параметры: горизонтальные перемещения трубопровода (основания трубопровода)  $U_x^{max}$ , м; вертикальные перемещения трубопровода (основания трубопровода)  $U_y^{max}$ , м; отношение площади мульды сдвижения земной поверхности к площади уменьшения сечения горной выработки  $A_s/A_L$ . По  $A_s/A_L$  оценивалась степень адекватности расчетов. При  $A_s/A_L = 1$  расчет считался абсолютно адекватным по отношению к указанному критерию. При существенных отклонениях от указанного равенства считалось, что модель не подходит для решаемых задач.

При моделировании выработки полезных ископаемых использовалась нелинейная идеально-упругопластическая геомеханическая модель Мора – Кулона. Газопровод моделировался элементом типа *embedded beam* (балка, погруженная в грунт) с заданной жесткостью. Закрепление на концах магистрального газопровода принималось свободным. Расстояние между нижней границей расчетной области и нижней точкой горной выработки принималось равным половине ширины вертикальной проекции горной выработки. Воздействие от подработки реализовывалось с использованием функции «*volume strain*» программного

комплекса, позволяющей задавать уменьшение конечного элемента. Численный расчет деформаций основания и дополнительных осевых напряжений подрабатываемого магистрального газопровода выполнялся для условия завершения подработки.

Выбор расчетных ситуаций и численные исследования выполнялись в несколько этапов.

На *первом этапе* исследовалось влияние включения трубопровода в расчетную модель (сравнивались модели «грунтовый массив – выработка – трубопровод» и «грунтовый массив – выработка») и масштабного фактора (сравнивались расчеты в объемной и плоской постановке).

Были выполнены два расчета в объемной постановке с включением в расчетную модель трубопровода и без него. Полученные результаты сопоставлялись с расчетами в плоской постановке без учета жесткости магистрального газопровода. На основе анализа полученных результатов оценивалась возможность и допустимость выполнения расчетов в плоской постановке без включения в модель трубопровода. Анализ расчетов показал целесообразность и допустимость выполнения оценки чувствительности численных результатов и параметрического анализа в плоской постановке без включения в модель трубопровода. Расчет выработки полезных ископаемых в объемной постановке разрабатывался мощностью 1,5 м, шириной 300 м, длиной 900 м, с углом падения  $30^\circ$  к горизонтали, глубиной залегания 400 м.

На *втором этапе* исследовалось влияние параметров расчетной схемы, необходимых для разработки основных положений методики: ширины расчетной области модели, размеров сетки конечных элементов модели. Для ширины расчетной области рассматривались три варианта: две, три и шесть глубин заложения нижней точки горной выработки. Для сетки конечных элементов модели анализировались также три варианта: 1,8 м (очень мелкая сетка); 3,6 м (средняя сетка); 7,3 м (очень крупная сетка).

На *третьем этапе* исследовалось влияние инженерно-геологических и конструктивно-технологических факторов выработки, в качестве которых исследовались параметры геомеханической модели грунта, а также глубина заложения, мощность, угол падения, ширина разрабатываемого пласта полезных ископаемых.

Грунтовый массив моделировался толщей дисперсных грунтов, подстилаемых полускальными отложениями. В качестве дисперсных грунтов рассматривались песок и суглинки с типичными для них физико-механическими свойствами, приведенными в табл. 1. Полускальные грунты моделировались в трех вариантах – аргиллит пониженной, средней и повышенной степени прочности (табл. 2). Общий вид расчетной схемы и варианты параметров выработки полезных ископаемых приведены на рис. 1 и в табл. 3.

## Результаты численных расчетов

*Исследование влияния включения трубопровода в расчетную модель (сравнение моделей «грунтовый массив – выработка – трубопровод» и «грунтовый массив – выработка») и масштабного фактора (сравнение расчетов в объемной и плоской постановке)*

Сравнение результатов расчетов (табл. 4, рис. 2) в объемной постановке для двух типов моделей (с включением в модель трубопровода и без него) позволяет отметить следующее. Эпюры вертикальных перемещений практически совпадают, значения горизонтальных

Таблица 1

**Характеристики физико-механических свойств дисперсных грунтов**

Table 1

**Physical and mechanical characteristics of dispersive soils**

Вид грунта	Характеристики грунтов						
	$\gamma$ , кН/м <sup>2</sup>	$e$	$E$ , МПа	$c$ , кПа	$\varphi$ , °	$\nu$	$R_{нт}$
Песок	17,5	0,68	27	1	30	0,35	0,5
Суглинок*	20,2	0,84	8	18	15	0,37	0,67

Примечание: \* – данный вид грунта и его характеристики принимались в качестве среднего значения при изучении влияния других факторов

Note: \* – this type of the soil and its characteristics were taken in terms of an average value during studying the influence of other factors

Таблица 2

**Характеристики физико-механических свойств полускальных грунтов**

Table 2

**Physical and mechanical characteristics of semi-rocky soils**

Вид грунта	Постоянные характеристики				Изменяемые характеристики		
	$\gamma$ , кН/м <sup>2</sup>	$e$	$\nu$	$R_{нт}$	$E$ , МПа	$c$ , кПа	$\varphi$ , °
Аргиллит пониженной прочности	25	-	0,3	1	1600	120	30
Аргиллит средней прочности					2000	150	36,8
Аргиллит повышенной прочности					2400	180	44,2

Примечание: \* – данный вид грунта и его характеристики принимались в качестве среднего значения при изучении влияния других факторов

Note: \* – this type of the soil and its characteristics were taken in terms of an average value during studying the influence of other factors

Таблица 3

**Варианты параметров выработки полезных ископаемых**

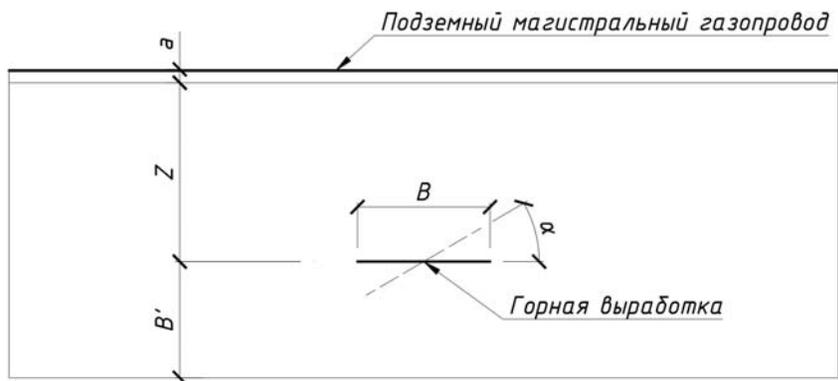
Table 3

**Variants of mineral excavation parameters**

Параметры выработки	Значения параметров		
Глубина заложения $H_z$ , м	100	400*	800
Мощность $m$ , м	0,5	1,5*	5
Угол падения $\alpha$ , °	0	30*	60
Ширина $B$ , м	200	300*	500

Примечание: \* – данные характеристики принимались в качестве среднего значения при изучении влияния других факторов

Note: \* – this type of the soil and its characteristics were taken in terms of an average value during studying the influence of other factors



**Рис. 1.** Общий вид расчетной схемы:

$B$  – ширина выработки;  $B'$  – горизонтальная проекция выработки;  $Z$  – глубина заложения середины выработки;  $a$  – угол наклона выработки

**Fig. 1.** General view of the calculation scheme:  $B$  – excavation width;  $B'$  – horizontal excavation projection;  $Z$  – bedding depth of the excavation middle;  $a$  – excavation dip angle

перемещений очень близки. Для модели с включением в нее трубопровода эпюра имеет более изменчивый характер, что вероятно связано с особенностями (дискретностью) сетки конечных элементов трубопровода.

Из расчетов следует, что при больших глубинах заложения выработок (по сравнению с неглубокой подработкой) влияние жесткости трубопровода слабое или незначительное. Очевидно, этим объясняется тот факт, что существующие (нормированные) горные методы расчета деформаций трубопроводов от влияния подработки при добыче полезных ископаемых не учитывают его жесткость (диаметр и толщину стенки).

Сравнение результатов расчетов в объемной и плоской постановке (табл. 5, рис. 3), без включения в модель трубопровода, показывают, что при 2D-моделировании деформации грунтов несколько выше (на 21 %), чем при 3D. Таким образом, численные расчеты в 2D-постановке допустимы, однако дают более консервативные (с запасом) значения параметров напряженно-деформированного состояния трубопровода. Такое соотношение результатов 2D- и 3D-расчетов объясняется масштабным фактором и вполне согласуется с авторской практикой расчетов трубопроводов при оценке влияния на них от строительства тоннелей и коллекторов различного назначения.

В результате было признано допустимым и целесообразным дальнейшие численные расчеты выполнять в 2D-постановке без включения в модель трубопровода, то есть с некоторым запасом (в консервативном варианте).

### *Исследование влияния ширины расчетной области*

Как видно из табл. 6 и рис. 4, ширина расчетной области модели существенно влияет на напряженно-деформированное состояние подрабатываемого трубопровода. При ширине расчетной области, равной одной глубине заложения выработки, расчет дал неадекватные результаты. С увеличением ширины расчетной области с одной до шести глубин максимальные вертикальные перемещения грунта вдоль оси трубопровода увеличились всего

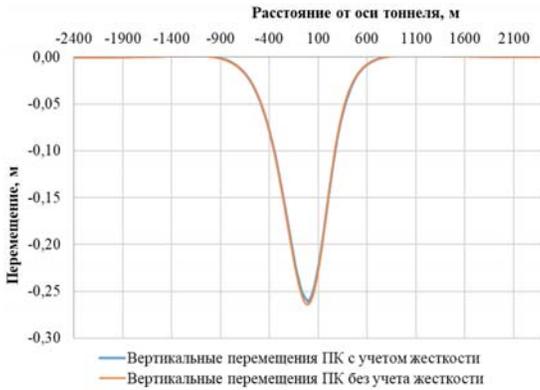
Таблица 4

**Результаты расчетов по оценке учета жесткости трубопровода при моделировании в объемной постановке**

Table 4

**Results of calculations on the evaluation of the pipeline stiffness effect during 3D modeling**

Расчетные варианты	$U_y^{max}$ , м
Plaxis 3D (с моделированием трубопровода)	0,26
Plaxis 3D (без моделирования трубопровода)	0,26



**Рис. 2.** Деформации земной поверхности при моделировании с учетом жесткости трубопровода и без учета: *a* – вертикальные перемещения; *б* – величина кривизны трубопровода

**Fig. 2.** Surface terrain deformations during modeling with and without taking into account the pipeline stiffness: *a* – vertical shifts; *б* – pipeline curvature

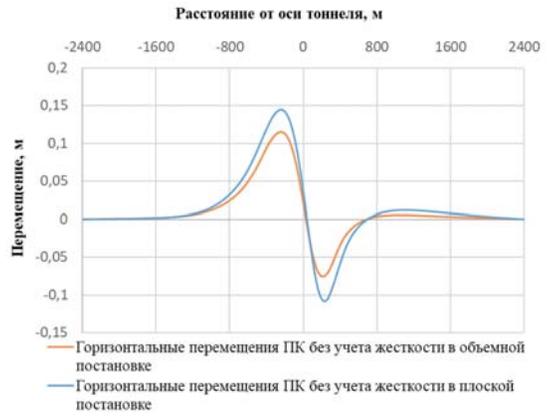
Таблица 5

**Результаты расчетов по оценке влияния масштабного фактора (моделирование в объемной и плоской постановке)**

Table 5

**Results of calculations on the evaluation of the scale factor effect (2D and 3D modeling)**

Расчетные варианты	$U_x^{max}$ , м	$U_y^{max}$ , м
Plaxis 3D (без моделирования трубопровода)	0,11	0,26
Plaxis 2D (без моделирования трубопровода)	0,14	0,33



**Рис. 3.** Перемещения подрабатываемого трубопровода без включения его в модель, в плоской и объемной постановке: *a* – вертикальные; *б* – горизонтальные (осевые)

**Fig. 3.** Shifts of the undermined pipeline without its accounting in the model (2D and 3D modelling): *a* – vertical; *б* – horizontal (axial)

Таблица 6

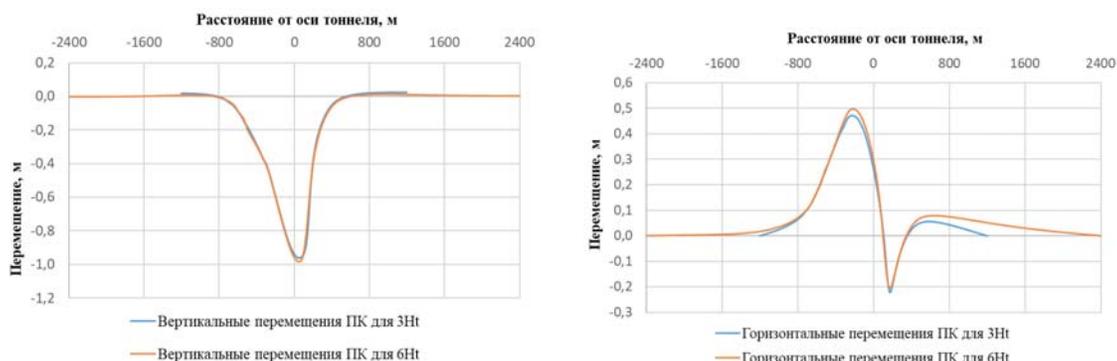
**Результаты расчетов по оценке влияния ширины расчетной области модели**

Table 6

**Results of calculations on the evaluation of the model design area width effect**

Ширина расчетной области	$U_x^{max}$ , м	$U_y^{max}$ , м	$A_s/A_L$
1Н <sub>1</sub>	0,309	0,899	1,095
3Н <sub>1</sub>	0,473	0,962	1,002
6Н <sub>1</sub> *	0,497	0,984	1,052

Примечание: \* – принимались в качестве средних значений при изучении влияния других факторов  
 Note: \* – these values were taken in terms of average ones during studying the influence of other factors



**Рис. 4.** Перемещения подрабатываемого трубопровода в зависимости от ширины расчетной области модели: а – вертикальные; б – горизонтальные (осевые)  
**Fig. 4.** Shifts of the undermined pipeline depending on the width of the model design area: а – vertical; б – horizontal (axial)

на 9 %, максимальные горизонтальные больше – на 38 %. Характер эпюр перемещений близок. Отношение  $A_s/A_L$  отличается от единицы на 0–9 %, что вполне допустимо и говорит об адекватности модели. Было решено при выполнении дальнейших численных исследований ширину расчетной области принимать равной шести глубинам заложения выработки.

*Исследование влияния размеров сетки конечных элементов модели*

Представленные в табл. 7 и на рис. 5 результаты расчетов показывают, что размер сетки оказывает сравнительно слабое влияние на изменение напряженно-деформируемого состояния подрабатываемого трубопровода – эпюры максимальных вертикальных и горизонтальных перемещений грунта по оси трубопровода практически совпадают. При уменьшении размеров сетки от очень крупной до очень мелкой максимальные вертикальные перемещения грунта вдоль оси трубопровода уменьшаются на 5 %, максимальные горизонтальные – на 3 %. Отношение  $A_s/A_L$  отличается от единицы на 3–6 %, что вполне допустимо и говорит об адекватности модели. При выполнении дальнейших численных расчетов в рамках данной НИР было решено разбивать расчетную область с использованием средней сетки конечных элементов.

Таблица 7

## Результаты расчетов по оценке влияния размера сетки конечных элементов модели

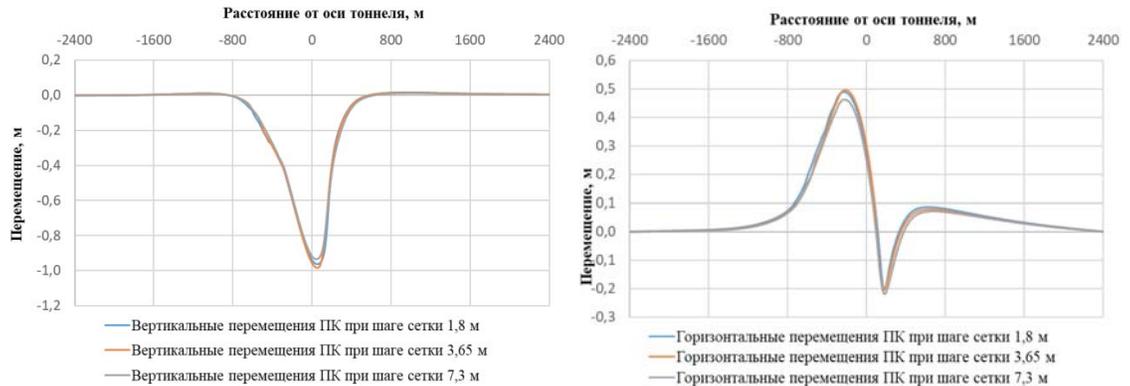
Table 7

## Results of calculations on the evaluation of the finite element mesh size effect

Размер конечного элемента, м	$U_x^{max}$ , м	$U_y^{max}$ , м	$A_s/A_L$
1,8 (очень мелкая сетка)	0,488	0,962	1,058
3,6* (средняя сетка)	0,497	0,984	1,052
7,3 (очень крупная сетка)	0,463	0,936	1,034

Примечание: \* – принимались в качестве средних значений при изучении влияния других факторов

Note: \* – these values were taken in terms of average ones during studying the influence of other factors



а

б

Рис. 5. Перемещения подрабатываемого трубопровода в зависимости от размера сетки конечных элементов модели: а – вертикальные; б – горизонтальные (осевые)

Fig. 5. Shifts of the undermined pipeline depending on the mesh size of the finite element model: а – vertical; б – horizontal (axial)

### Исследование влияния параметров геомеханической модели грунта (механических характеристик)

Из табл. 8 и 9 следует, что вид и механические характеристики вмещающего трубопровод дисперсного грунта оказывают очень слабое влияние на изменение напряженно-деформируемого состояния подрабатываемого трубопровода. Для песка и суглинка эпюры максимальных вертикальных и горизонтальных перемещений грунта по оси трубопровода практически совпадают (разница всего 0,8 %).

Разновидность и механические характеристики полускального грунта, подстилающего дисперсный и составляющего основную часть грунтового массива, в котором ведется разработка полезных ископаемых, в большей степени влияют на изменение состояния подрабатываемого трубопровода. Так, для аргиллита повышенной и пониженной прочности и деформативности разница максимальных горизонтальных и вертикальных перемещений грунта по оси трубопровода составляет 23 и 16 % соответственно. Характер эпюр перемещений в целом совпадает, однако для аргиллита более низкой прочности эпюры имеют более плавный характер, с меньшей кривизной и более низкими значениями экстремумов. Отношение  $A_s/A_L$  отличается от единицы на 2–7 %, что вполне допустимо.

Таблица 8

**Результаты расчетов по оценке влияния параметров геомеханической модели дисперсного грунта**

Table 8

**Results of calculations on the evaluation of the effect caused by the parameters of the dispersive soil geomechanical model**

Грунт	$U_x^{max}$ , м	$U_y^{max}$ , м	$A_s/A_L$
Песок	0,493	0,976	1,025
Суглинок*	0,497	0,984	1,052

Примечание: \* – принимались в качестве средних значений при изучении влияния других факторов  
Note: \* – these values were taken in terms of average ones during studying the influence of other factors

Таблица 9

**Результаты расчетов по оценке влияния параметров геомеханической модели полускального массива грунта**

Table 9

**Results of calculations on the evaluation of the effect caused by the parameters of the semi-rocky soil geomechanical model**

Грунт	$U_x^{max}$ , м	$U_y^{max}$ , м	$A_s/A_L$
Аргиллит пониженной прочности и деформативности	0,431	0,899	1,021
Аргиллит средней прочности и деформативности*	0,497	0,984	1,052
Аргиллит повышенной прочности и деформативности	0,562	1,068	1,069

Примечание: \* – принимались в качестве средних значений при изучении влияния других факторов  
Note: \* – these values were taken in terms of average ones during studying the influence of other factors

**Исследование влияния глубины залегания пласта полезных ископаемых**

Глубина залегания разрабатываемого пласта полезных ископаемых оказывает значительное влияние на НДС подрабатываемого трубопровода. Как видно из табл. 10 и рис. 6, с изменением глубины залегания от 100 до 800 м максимальные горизонтальные перемещения грунта вдоль оси трубопровода уменьшаются более чем в три раза, а вертикальные – в четыре раза. Кривизна и значения экстремумов эпюр перемещений также существенно изменяются. Отношение  $A_s/A_L$  отличается от единицы на 5–9 %, что вполне допустимо.

**Исследование влияния мощности разрабатываемого пласта полезных ископаемых**

Мощность разрабатываемого пласта, как и глубина залегания, оказывает большое влияние на НДС подрабатываемого трубопровода. С увеличением мощности с 0,5 до 5 м (табл. 11, рис. 7) максимальные вертикальные и горизонтальные перемещения грунта вдоль оси трубопровода увеличиваются в 15–16 раз. Отношение  $A_s/A_L$  отличается от единицы на 5–17 %, что в целом допустимо.

Таблица 10

## Результаты расчетов по оценке влияния глубины залегания разрабатываемого пласта

Table 10

## Results of calculations on the evaluation of the mined seam bedding depth effect

Глубина середины выработки	$U_x^{max}$ , м	$U_y^{max}$ , м	$A_s/A_L$
100 м	0,646	1,632	0,918
400 м*	0,497	0,984	1,052
800 м	0,205	0,427	0,968

Примечание: \* – принимались в качестве средних значений при изучении влияния других факторов

Note: \* – these values were taken in terms of average ones during studying the influence of other factors

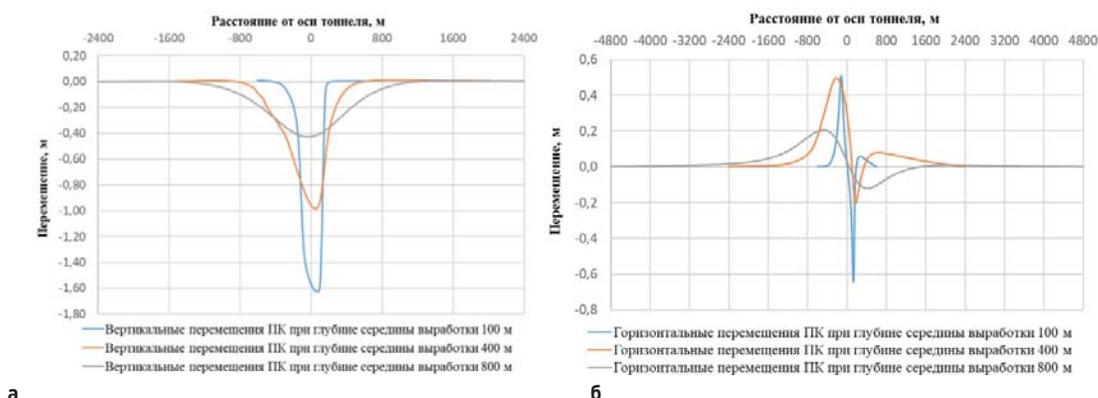


Рис. 6. Перемещения подрабатываемого трубопровода в зависимости от глубины залегания разрабатываемого пласта: а – вертикальные; б – горизонтальные (осевые)

Fig. 6. Shifts of the undermined pipeline depending on the bedding depth of the mined seam: а – vertical; б – horizontal (axial)

### Исследование влияния угла падения разрабатываемого пласта полезных ископаемых

Анализ табл. 12 и рис. 8 показывает, что угол падения пласта оказывает значительное влияние. С увеличением угла вертикальные и горизонтальные перемещения увеличиваются, причем наибольшая интенсивность отмечена в диапазоне  $0-30^\circ$ . Для горизонтальных перемещений зависимость от угла падения больше, чем для вертикальных. При увеличении наклона выработки с  $0$  до  $30^\circ$  максимальные горизонтальные перемещения увеличиваются на 50 %, при увеличении с  $30$  до  $60^\circ$  – на 7 %. Аналогичное увеличение для вертикальных перемещений составило 38 и 2,5 % соответственно. Эпюры перемещений в целом имеют схожий характер, при этом положение экстремумом на графиках с изменением угла падения смещается. Отношение  $A_s/A_L$  отличается от единицы на 5–9 %, что вполне допустимо.

Таблица 11

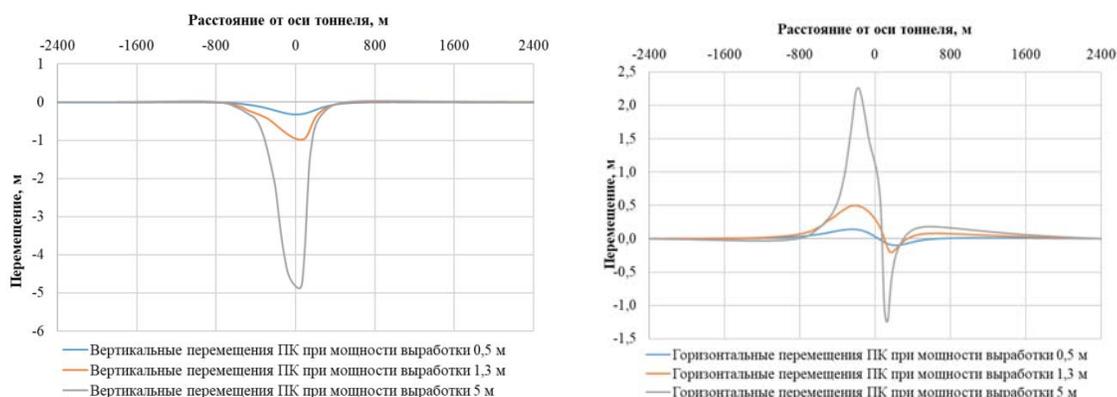
**Результаты расчетов по оценке влияния мощности разрабатываемого пласта**

Table 11

**Results of calculations on the evaluation of the mined seam thickness effect**

Мощность выработки	$U_x^{max}$ , м	$U_y^{max}$ , м	$A_s/A_L$
0,5 м	0,14	0,32	1,172
1,3 м*	0,497	0,984	1,052
5 м	2,27	4,88	1,140

Примечание: \* – принимались в качестве средних значений при изучении влияния других факторов  
 Note: \* – these values were taken in terms of average ones during studying the influence of other factors



**Рис. 7.** Перемещения подрабатываемого трубопровода в зависимости от мощности разрабатываемого пласта: а – вертикальные; б – горизонтальные (осевые)

**Fig. 7.** Shifts of the undermined pipeline depending on the thickness of the mined seam: a – vertical; б – horizontal (axial)

*Исследование влияния числа разрабатываемых пластов полезных ископаемых*

Сравнение результатов расчетов, представленных в табл. 13 и рис. 9, показывает, что число пластов оказывает большое влияние на НДС подрабатываемого трубопровода. С увеличением числа пластов от одного до двух максимальные горизонтальные и вертикальные перемещения грунта вдоль оси трубопровода увеличиваются в три раза. Кривизна и значения экстремумов эпюр перемещений также значительно увеличиваются. Отношение  $A_s/A_L$  отличается от единицы на 4–5 %, что вполне допустимо.

*Исследование влияния ширины разрабатываемых пластов полезных ископаемых*

Ширина разрабатываемых пластов оказывает большое влияние на НДС подрабатываемого трубопровода. С увеличением ширины вертикальные и горизонтальные перемещения заметно увеличиваются, причем вертикальные в большей степени. Так, при увеличении ширины с 200 до 500 м максимальные горизонтальные перемещения увеличились в 1,5 раза,

Таблица 12

## Результаты расчетов по оценке влияния угла падения разрабатываемого пласта

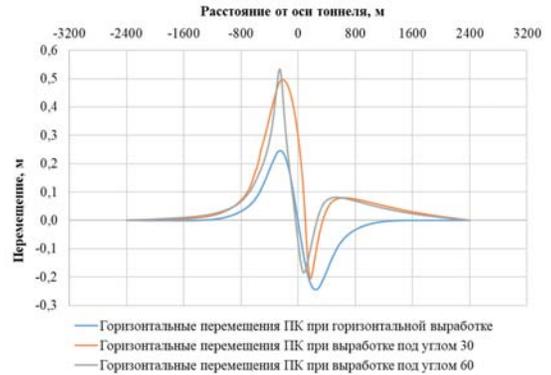
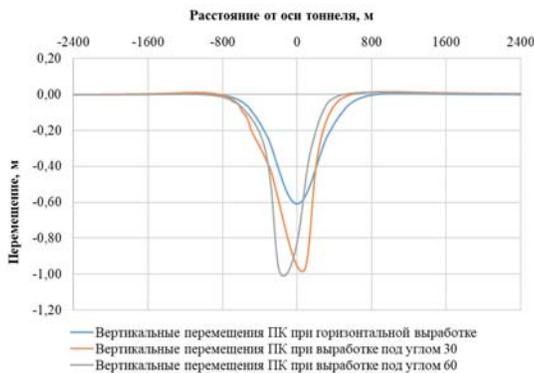
Table 12

## Results of calculations on the evaluation of the mined seam dip angle effect

Угол наклона	$U_x^{max}$ , м	$U_y^{max}$ , м	$A_s/A_L$
0°	0,247	0,610	0,922
30°*	0,497	0,984	1,052
60°	0,533	1,010	1,096

Примечание: \* – принимались в качестве средних значений при изучении влияния других факторов

Note: \* – these values were taken in terms of average ones during studying the influence of other factors



а

б

Рис. 8. Перемещения подрабатываемого трубопровода в зависимости от угла падения разрабатываемого пласта: а – вертикальные; б – горизонтальные (осевые)

Fig. 8. Shifts of the undermined pipeline depending on the dip angle of the mined seam: a – vertical; б – horizontal (axial)

максимальные вертикальные перемещения – в 2,2 раза (табл. 14, рис. 10). Отношение  $A_s/A_L$  отличается от единицы на 1–6 %, что вполне допустимо.

## Верификация методики расчета при подработке газопроводов горными выработками

Верификация методики выполнена путем сравнения расчетных и фактических параметров сдвижения горных пород. Инженерно-геодезические наблюдения за вертикальными и горизонтальными перемещениями поверхности земли при разработке пласта угля выполнялись в подмосковном угольном бассейне при разработке пласта угля на шахте № 5 Щекинской [7, 16].

Массив грунта сверху вниз был сложен песком (толщина слоя 32 м), суглинком (толщина слоя 27 м), известняком (толщина слоя 21 м). Очистная выработка залегала на глубине 62 м, ее размеры в плане составляли 60 на 60 м, мощность пласта – 2 м. В результате разработки угля максимальная осадка поверхности земли в мульде составила  $S_{\phi}^{max} = 1,36$  м. Минимальный радиус кривизны –  $\rho_{min} = 160$  м. Максимальное относительное горизонтальное перемещение растяжения –  $\varepsilon_{max} = 0,022$  мм/м.

Таблица 13

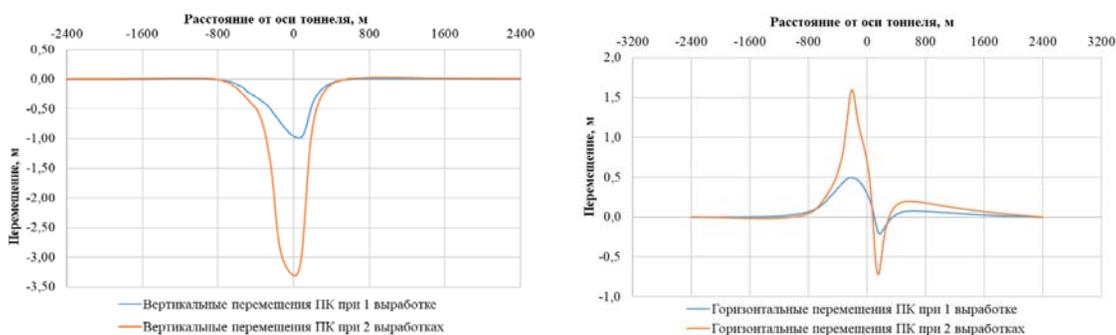
**Результаты расчетов по оценке влияния числа разрабатываемых пластов**

Table 13

**Results of calculations on the evaluation of the effect caused by the number of mined seams**

Кол-во	$U_x^{max}, м$	$U_y^{max}, м$	$A_s/A_L$
1 пласт*	0,497	0,984	1,052
2 пласта	1,594	3,312	1,042

Примечание: \* – принимались в качестве средних значений при изучении влияния других факторов  
 Note: \* – these values were taken in terms of average ones during studying the influence of other factors



**а** **б**  
**Рис. 9.** Перемещения подрабатываемого трубопровода в зависимости от числа разрабатываемых пластов:  
 а – вертикальные; б – горизонтальные (осевые)

**Fig. 9.** Shifts of the undermined pipeline depending on the number of mined seams: а – vertical; б – horizontal (axial)

Для сравнения, согласно указаниям [4, 5], выполнялся расчет традиционным горным методом прогноза деформаций и сдвижений земной поверхности под влиянием горных работ при выемке полезных ископаемых [10, 12]. Сравнительные данные представлены в табл. 15 и на рис. 11.

Вертикальные перемещения, рассчитанные по горной методике, в целом дают более близкие значения к фактическим осадкам, чем полученные численным методом. Разработанная методика дает некоторое завышение осадок в центральной части мульды. Так, по центру выработки завышение составляет 13 %. В то же время для горного метода разница здесь всего 2 %. Однако основным параметром вертикальных деформаций, в наибольшей степени влияющим на дополнительные растягивающие напряжения в подрабатываемом газопроводе, является минимальный радиус кривизны  $\rho_{min}$ . По данным результатам разработанная методика дает более точные результаты. Его значение, рассчитанное по предлагаемой методике, существенно ближе к фактическим (разница 19 %), чем значение, рассчитанное по горному методу (разница 88 %).

Относительные горизонтальные перемещения  $\epsilon$ , рассчитанные по горной и предлагаемой методике, в целом дают близкие по точности результаты. Это хорошо демонстрируют графики рис. 11б. Наибольшие отклонения расчетных значений  $\epsilon$  от фактических отмечены в центральной части мульды. Занижение расчетных значений  $\epsilon$  по отношению к фактическим

Таблица 14

## Результаты расчетов по оценке влияния ширины разрабатываемых пластов

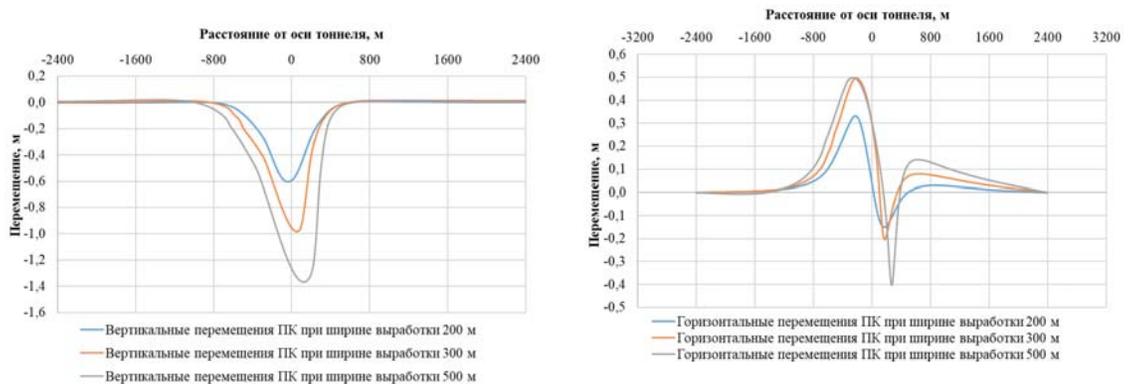
Table 14

## Results of calculations on the evaluation of the mined seam width effect

Ширина выработки	$U_x^{max}$ , м	$U_y^{max}$ , м	$A_s/A_L$
200 м	0,332	0,605	0,991
300 м*	0,497	0,984	1,052
500 м	0,498	1,365	1,066

Примечание: \* – принимались в качестве средних значений при изучении влияния других факторов

Note: \* – these values were taken in terms of average ones during studying the influence of other factors



**а** **б**  
**Рис. 10.** Перемещения подрабатываемого трубопровода в зависимости от ширины разрабатываемых пластов:  
 а – вертикальные; б – горизонтальные (осевые)

**Fig. 10.** Shifts of the undermined pipeline depending on the width of mined seams: а – vertical; б – horizontal (axial)

здесь составляет примерно 0,01 мм/м. Однако основным параметром горизонтальных деформаций, который в наибольшей степени влияет на дополнительные растягивающие напряжения в подрабатываемом газопроводе, является максимальное относительное горизонтальное перемещение растяжения  $\varepsilon_{max}$ . В зоне растяжения фактические значения  $\varepsilon_{max}$  наиболее близки к расчетным, полученным по предлагаемой методике, – отличие всего 5 %. Для горного метода разница существенно выше – 27 %.

Расчет на прочность (проверка недопустимых пластических деформаций) подрабатываемого магистрального газопровода от действия продольных растягивающих напряжений осуществляется согласно требованиям подраздела 12.4 СП 36.13330.2012 [3].

Для предотвращения недопустимых пластических деформаций магистрального трубопровода выполняется проверка условий:

$$|\sigma_{np}^n + \sigma_{np}^{под}| = \psi_1 \frac{m}{0.9 k_n} R_2^n \quad (1)$$

где  $\sigma_{np}^n$  – максимальные суммарные растягивающие продольные напряжения в трубопроводе от нормативных нагрузок и воздействий (без учета влияния подработки трубопровода), определяются по [3];

$\sigma_{np}^{pod}$  – растягивающие продольные напряжения в трубопроводе, возникающие в результате его подработки (от горизонтальных и вертикальных деформаций грунта);  
 $\psi_1$  – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб; при растягивающих продольных напряжениях принимаемый равным единице;  
 $m$  – коэффициент условий работы трубопровода, принимаемый по [3];  
 $k_H$  – коэффициент надежности по ответственности трубопровода, принимаемый по [3];  
 $R_2^H$  – нормативное сопротивление растяжению сварных соединений, принимаемое по [3].

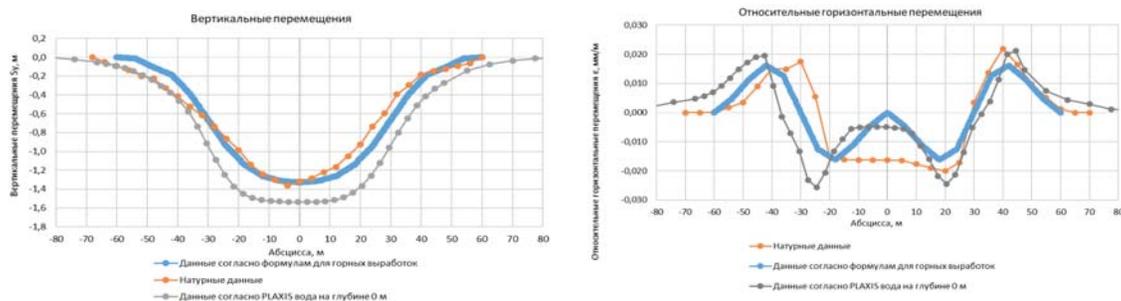
Таблица 15

**Максимальные фактические и расчетные деформации земной поверхности в мульдe сдвигания при разработке пласта угля на шахте № 5 Щекинской**

Table 15

**Maximum actual and calculated deformations of the surface terrain in the shift trough during the coal seam excavation at the Shchekino mine No. 5**

Показатели деформаций	Фактические значения [7, 16]	Расчетные значения по методике (отношение расчетных значений к фактическим $S_p/S_\phi$ )	
		горной [10, 12]	разработанной [6]
Максимальные вертикальные перемещения $S_\phi^{max}$ , м	1,36	1,33 (0,98)	1,54 (1,13)
Максимальное относительное горизонтальное перемещение растяжения $\varepsilon_{max}$ , мм/м	0,022	0,016 (0,73)	0,021 (0,95)
Минимальный радиус кривизны $\rho_{min}$ , м	160	301 (1,88)	190 (1,19)



**Рис. 11.** Фактические и расчетные перемещения поверхности земли при разработке пласта угля на шахте № 5 Щекинской: а – вертикальные; б – относительные горизонтальные

**Fig. 11.** Actual and calculated shifts of the surface terrain during the coal seam excavation at the Shchekino mine No. 5: а – vertical; б – relative horizontal

## Выводы

1. В результате исследований предложена методика расчета на прочность подземных магистральных газопроводов на подрабатываемых территориях, основанная на численном моделировании влияния разработки полезных ископаемых в геотехнических программных комплексах.

2. Методика основана на исследовании степени и характера влияния различных факторов на результаты численного моделирования: включения трубопровода в расчетную модель; ширины расчетной области модели; размеров сетки конечных элементов; параметров геомеханической модели грунта; ширины, глубины заложения, угла наклона, мощности и числа разрабатываемых пластов полезных ископаемых; постановки задачи (2D или 3D).

3. Верификация методики, выполненная путем сравнения с расчетными по традиционному горному методу и фактическими (инженерно-геодезическими наблюдениями за вертикальными и горизонтальными перемещениями поверхности земли при разработке пласта угля на одной из шахт подмосковного угольного бассейна) значениями параметров сдвига горных пород показала, что предложенная авторами методика имеет неплохую точность, дает сопоставимые (лучшие по минимальному радиусу кривизны и максимальным относительным горизонтальным перемещениям в растянутой зоне) по точности с горным методом результаты. При соответствующей верификации для конкретных условий глубокой подработки она может использоваться для оценки изменения НДС основания магистральных газопроводов и их расчета на прочность при подработке с целью выемки полезных ископаемых.

## Список литературы

1. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2015.
2. ГОСТ Р 53778-2010 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Москва: Стандартинформ; 2010.
3. СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85\*. Москва: Минрегион России; 2012.
4. РД 07-166-97 Инструкция по наблюдениям за сдвигами земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений. В: Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль: сборник документов. Серия 07. Выпуск 8. Москва: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности»; 2010, с. 102–176.
5. ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Москва: Стандартинформ; 2014.
6. НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство». Разработка методики расчета на прочность подземных магистральных газопроводов на подрабатываемых территориях. Отчет о научно-исследовательской работе. Москва; 2021.
7. Авершин С.Г. Сдвигание горных пород. Москва: Углетехиздат; 1947.
8. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. Москва: Недра; 1982.
9. Богомолова О.А., Жиделев А.В. Влияние параметров подземной выработки на величину осадки дневной поверхности подрабатываемой территории. Construction and Geotechnics. 2020;11(2):5–18. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.2.01>

10. *Гениев Г.А.* Практический метод определения перемещений земной поверхности и напряженного состояния грунтов, вызванных подземными выработками. *Строительная механика и расчет сооружений.* 1977;(3):10–14.
11. *Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Тупилов М.М.* Исследование деформирование грунтовых массивов при строительстве мелкозаглубленных коммуникационных тоннелей. *Основания, фундаменты и механика грунтов.* 2011;(3):8–15.
12. *Иофис М.А., Коновалов П.А., Майоров С.Г.* Инструкция за наблюдениями за сдвигами земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве. Москва: ИПКОН РАН; 1997.
13. *Лонжид Этур.* Прогноз сдвижений и деформаций горных пород и земной поверхности при пересечении тоннелями метро неоднородных слоистых пород с различной литологией: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: СПГУ; 2018.
14. *Петрухин В.П., Исаев О.Н., Шарафутдинов Р.Ф.* Моделирование деформаций грунтового массива при проходке тоннелей. Часть 1: Исследования влияния расчетных параметров. *Транспортное строительство.* 2014;(9):7–11.
15. *Петрухин В.П., Исаев О.Н., Шарафутдинов Р.Ф.* Моделирование деформаций грунтового массива при проходке тоннелей. Часть 2: Методика выбора параметров численного моделирования. *Транспортное строительство.* 2014;(10):14–15.
16. *Поляк З.И.* Сдвигание горных пород в подмосковном угольном бассейне. Москва: Углетехиздат; 1947.
17. *Шейнин В.И., Пушилилин А.Н.* Оценка усилий в конструкциях зданий, возникающих из-за проходки подземной выработки. В: Сборник научных трудов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова: 75 лет. – Москва: Экономика, строительство, транспорт; 2006, с. 66–73.
18. *Пушилилин А.Н., Шейнин В.И.* Разработка инженерной схемы расчета конструкций зданий с учетом смещений земной поверхности, вызываемых проходкой тоннеля. Москва: ПАТ; 2002.
19. *Пушилилин А.Н., Фаворов А.В., Шейнин В.И.* Метод расчета усилий в конструкциях зданий при деформировании основания из-за проходки подземной выработки. *Основания, фундаменты и механика грунтов.* 2007;(3):2–6.
20. *Строкова Л.А.* Численное моделирование оседания поверхности при проходке метрополитена. *Основания, фундаменты и механика грунтов.* 2009;(3):29–31.

## References

1. State Standard 27751-2014 Reliability of building structures and foundations. The main provisions. Moscow: Standartinform Publ.; 2015 (in Russian).
2. State Standard R 53778-2010 Buildings and structures. Rules of inspection and monitoring of technical condition. Moscow: Standartinform Publ.; 2010 (in Russian).
3. SP 36.13330.2012 Trunk pipelines. Updated version of SNiP 2.05.06-85\*. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2012 (in Russian).
4. RD 07-166-97 Instructions for observing the movements of the Earth's surface and objects located on it during the construction of underground structures in Moscow. In: Protection of mineral resources and geological surveying control: a collection of documents. Episode 07. Issue 8. Moscow: CJSC "Scientific and Technical Center for Industrial Safety Research"; 2010, p. 102–176 (in Russian).
5. State Standard 31937-2011 Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of technical condition. Moscow: Standartinform Publ.; 2014 (in Russian).
6. NIIOSP named after N.M. Gersevanov JSC "SIC "Construction". Development of a methodology for calculating the strength of underground main gas pipelines in the territories under development. Report on the research work. Moscow; 2021 (in Russian).
7. *Avershin S.G.* Displacement of rocks. Moscow: Ugletekhizdat Publ.; 1947 (in Russian).
8. *Einbinder A.B., Kamerstein A.G.* Calculation of trunk pipelines for strength and stability. Moscow: Nedra Publ.; 1982 (in Russian).
9. *Bogomolova O.A., Zhidlev A.V.* The influence of the parameters of underground mining on the amount of precipitation of the daily surface of the moonlit area. *Construction and Geotechnics.* 2020;11(2):5–18 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.2.01>

10. *Geniev G.A.* A practical method for determining the movements of the earth's surface and the stressed state of soils caused by underground workings. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 1977;(3):10–14 (in Russian).
11. *Ilyichev V.A., Nikiforova N.S., Tupikov M.M.* Study of deformation of soil massifs during the construction of shallow communication tunnels. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov = Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2011;(3):8–15 (in Russian).
12. *Iofis M.A., Konovalov P.A., Mayorov S.G.* Instructions for observing the movements of the Earth's surface and objects located on it during construction. Moscow: IPKON RAS Publishing House; 1997 (in Russian).
13. *Longjid Ehtur.* Forecast of displacements and deformations of rocks and the Earth's surface when crossing the subway tunnels of heterogeneous layered rocks with different lithology [dissertation]. Saint Petersburg: Saint Petersburg Mining University; 2018 (in Russian).
14. *Petrukhin V.P., Isaev O.N., Sharafutdinov R.F.* Modeling of deformations of a soil massif during tunneling. Part 1: Studies of the influence of calculated parameters. *Transportnoe stroitel'stvo = Transport construction*. 2014;(9):7–11 (in Russian).
15. *Petrukhin V.P., Isaev O.N., Sharafutdinov R.F.* Modeling of deformations of a soil massif during tunneling. Part 2: Methods for selecting numerical simulation parameters. *Transportnoe stroitel'stvo = Transport construction*. 2014;(10):14–15 (in Russian).
16. *Polyak Z.I.* Displacement of rocks in the coal basin near. Moscow: Ugletekhizdat Publ.; 1947 (in Russian).
17. *Sheinin V.I., Pushilin A.N.* Evaluation of efforts in building structures arising from the penetration of underground workings. In: Collection of scientific works of N.M. Gersevanov NIIOSP: 75 years. Moscow: Ekonomika, stroitel'stvo, transport Publ.; 2006, p. 66–73 (in Russian).
18. *Pushilin A.N., Sheinin V.I.* Development of an engineering scheme for calculating building structures taking into account the displacements of the Earth's surface caused by tunneling. Moscow: RAT Publ.; 2002 (in Russian).
19. *Pushilin A.N., Favorov A.V., Sheinin V.I.* Method for calculating forces in building structures when the base is deformed due to tunneling underground workings. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov = Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2007;(3):2–6 (in Russian).
20. *Stroikova L.A.* Numerical modeling of surface subsidence during subway sinking. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov = Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2009;(3):29–31 (in Russian).

## Информация об авторах / Information about the authors

**Олег Николаевич Исаев** , канд. техн. наук, заведующий сектором геотехники линейных подземных сооружений НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: geotechnika2017@mail.ru

**Oleg N. Isaev** , Cand. Sci. (Engineering), Sectoral Head of Geotechnical Sector of Linear Underground Structures of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: geotechnika2017@mail.ru

**Дарина Павловна Кузнецова**, инженер сектора геотехники линейных подземных сооружений НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Darina P. Kuznetsova**, Engineer of Geotechnical Sector of Linear Underground Structures of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author