

Оценка влияния техногенных полей напряжений на напряженно-деформированное состояние подземных конструкций

М.О. Лебедев¹

А.С. Саммаль²

П.В. Деев²

С.В. Анциферов²

¹ ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, 191002, Россия, lebedev-lmgt@yandex.ru

² ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, 3000012, Россия, info@tsu.tula.ru

Аннотация: Предлагается новый подход к расчету подземных сооружений, расположенных в массиве пород, напряженно-деформированное состояние которого изменилось в результате техногенных воздействий. Оценка несущей способности конструкций определяется на основе новых аналитических решений ряда плоских задач теории упругости для полубесконечной среды, ослабленной подкрепленным круговым отверстием, при действии полей напряжений, обусловленных различными факторами, в частности, связанных с наземным и подземным строительством близко расположенных сооружений. Методы решения рассматриваемых задач основаны на применении комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили и аппарата аналитического продолжения регулярных в нижней полуплоскости функций через бесконечную прямолинейную границу в верхнюю полуплоскость. Предложенный подход реализован в виде соответствующего программного обеспечения. В качестве примера практического применения разработанного подхода выполнена оценка напряженного состояния обделки перегонного тоннеля метрополитена, пройденного вблизи заглубленных опор Западного скоростного диаметра г. Санкт-Петербурга. Выполненное сравнение полученных результатов с данными мониторинга подтвердило возможность практического использования предлагаемого подхода.

Ключевые слова: Тоннель, обделка, техногенные поля напряжений, сваи, теория упругости, аналитическое решение, функции комплексного переменного, расчёт. мониторинг.

Estimation of the influence of techno genic stress fields on the underground structures stress-strain state

M.O. Lebedev¹

A.S. Sammal²

P.V. Deev²

S.V. Antsiferov²

¹ JSC NIPII Lenmetrogioprotrans, St. Petersburg, 191002, Russia, lebedev-lmgt@yandex.ru

² Tula State University, Tula, 3000012, Russia, info@tsu.tula.ru

Annotation: A new approach to the design of underground structures in the rock mass, the stress-strain state of which has changed as a result of techno genic factors, is proposed. To estimate the influence of man-made impacts, a number of new analytical solutions of plane problems of elasticity theory for a semi-infinite medium weakened by a reinforced circular hole and subjected to the action of stress fields have been obtained.

Methods of solving the problems considered include the representation of stresses and deformations in the semi medium and the ring through derivatives of complex Kolosov-Muskhelishvili potentials and the apparatus of analytical continuation of regular functions in the lower half plane through on infinite rectilinear boundary into the upper half plane. The approach is implemented by the software. As an example of the approach application, a stress state estimation of the lining of the subway tunnel driven near the buried supports of the St. Petersburg Western High-speed diameter. The comparison of the obtained results with the monitoring data confirmed the possibility of practical use of the approach.

Keywords: Tunnel, lining, technogenic stress fields, piles, theory of elasticity, analytical solution, functions of complex variables, design, monitoring.

Введение

Проблема оценки влияния воздействий техногенного характера на напряженно-деформированное состояние горного массива и расположенных в нем подземных сооружений является весьма актуальной. Так, в практике строительства известны случаи, когда выемка грунта из котлована приводила к повреждению обделок близкорасположенных тоннелей [1]. Воздействия техногенного характера являлись также причиной искривления продольной оси тоннеля, возникновения продольных трещин и раскрытия стыков между блоками обделки. При этом защитные мероприятия, предусматриваемые проектами, не всегда позволяют снизить воздействия производимых строительных и земляных работ на окружающий массив и расположенные в нем сооружения до безопасного уровня [2]. В целом, исследования, краткий обзор которых приведен в работах [2,3], показывают, что при планировании горно-строительных работ, необходимо осуществлять постоянный мониторинг состояния несущих конструкций и выполнять оценку влияния техногенных факторов на подземные сооружения. При этом проектирование новых объектов подземного строительства также должно осуществляться с учетом существующих полей техногенных напряжений в горном массиве.

В настоящее время при расчете подземных сооружений широкое применение получили универсальные компьютерные программные комплексы, которые позволяют осуществлять прогноз напряженного состояния массивов горных пород и расположенных в нем конструкций [4, 5]. При этом у проектировщиков появляются широкие возможности реализации сложных геомеханических моделей «крепь – массив». Однако учет большого количества влияющих факторов при численном моделировании требует значительных затрат времени на подготовку исходных данных, выполнение расчетов и анализ полученных результатов, что делает весьма затруднительным применение таких моделей с целью рассмотрения большого количества вариантов проектируемых конструкций и определения их рациональных параметров. Кроме этого реализация сложных многофакторных моделей связана с проблемой получения необходимых для расчета параметров крепи и массива, определение которых требует проведения специальных дорогостоящих натурных и лабораторных исследований. В связи с этим наряду со сложными трехмерными расчетными схемами в практике проектирования успешно применяются более простые плоские модели [6].

Следует отметить, что необходимость ограничения в ходе численного моделирования размеров рассматриваемых областей и отсутствие строгих рекомендаций по заданию в формируемых компьютерных моделях соответствующих граничных условий может приводить к существенным погрешностям в ходе расчета. В связи с этим необходима корректировка используемых численных моделей на основе данных, например, полученных с помощью физического моделирования [7, 8] или

натурных наблюдений [6] с использованием систем мониторинга состояния подземных конструкций [9, 10].

Одним из перспективных направлений совершенствования проектирования является применение результатов обработки данных натурных наблюдений или численного моделирования с целью выявления соответствующих закономерностей, предназначенных для экспресс - оценки влияния строительных работ на величины усилий, возникающих в подземных конструкциях [11, 12].

В настоящее время с целью учета влияния строительных работ, выполняемых на дневной поверхности, в нормативно-технические документы ряда стран включены подходы к расчету подземных сооружений, основанные на методах строительной механики. При этом влияние техногенных воздействий моделируется равномерной нагрузкой, прикладываемой непосредственно к подземной конструкции, которая моделируется стержневой системой, а необходимые данные об интенсивности нагрузки определяется по приближенным формулам [13] или на основе численного моделирования [14]. Упрощенные подходы реализующие, в частности, теорию расчета балок на упругом основании, позволяют оценивать усилия, возникающие в поперечных сечениях обделки при искривлении трассы тоннеля, вызванном возведением зданий или производством земляных работ [15]. Применение относительно простого математического аппарата, тем не менее, позволяет получить результаты, хорошо согласующиеся с данными натурных наблюдений [16] и численного моделирования [17].

Аналитические методы, основанные на решениях соответствующих плоских задач теории упругости, играют важную роль на стадии предварительной проработки технических решений проекта [16 - 19]. Указанные методы позволяют определять напряжения и усилия в обделках тоннелей при действии нагрузок от зданий и транспортных средств на поверхности, в том числе с учетом технологической неоднородности вмещающего массива пород. К очевидным достоинствам аналитических методов следует отнести контролируемую точность решения поставленных задач, воспроизводимость получаемых результатов, высокую эффективность при выполнении многовариантных расчетов и возможность рассмотрения бесконечных и полубесконечных сред, которыми моделируется горный массив.

В настоящей работе предлагается решение новой задачи геомеханики, связанной с математическим моделированием напряженно-деформированного состояния подземных конструкций и вмещающих пород, подверженных действию нагрузок от зданий и сооружений с заглубленными (в том числе – свайными) фундаментами. При этом принимается, что в горном массиве формируются поля так называемых техногенных напряжений, которые накладываются на напряжения, обусловленные естественными факторами, например, действием собственного веса пород или давлением подземных вод. Такая постановка задачи дает возможность получения аналитических решений целого ряда прикладных задач геомеханики, используя имеющийся задел в теории расчета подземных сооружений [18, 19].

Методы исследования

С целью определения напряженно-деформируемого состояния обделки тоннеля, испытывающего воздействие техногенных полей напряжений, используется расчетная схема, представленная на рис. 1.

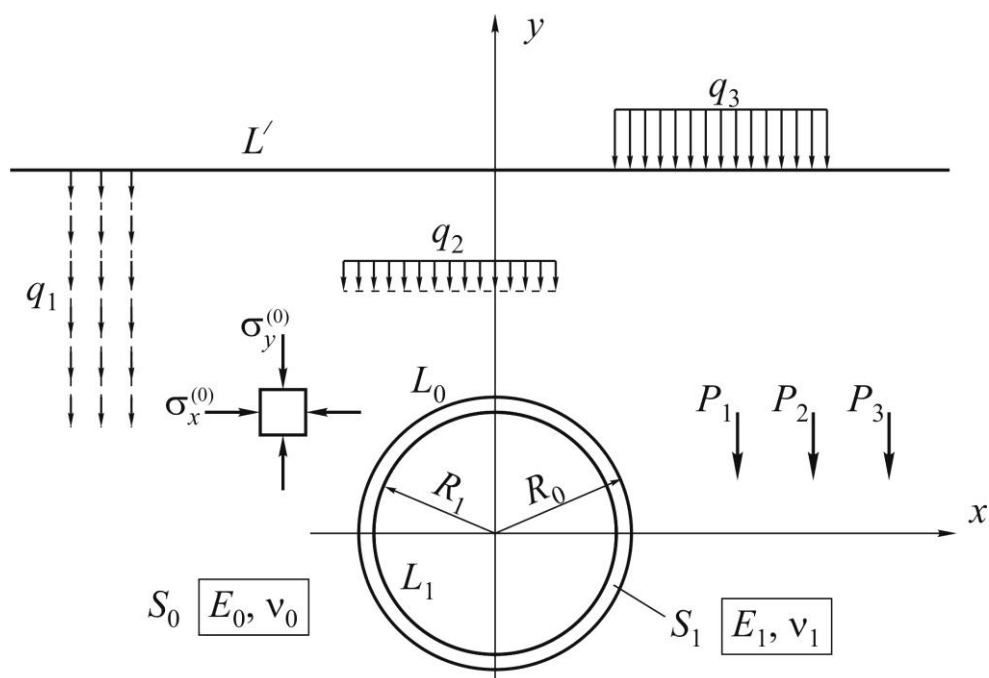


Рис. 1. Расчетная схема обделки тоннеля

Fig. 1. The design scheme of the tunnel

Здесь полубесконечная среда S_0 , моделирующая грунтовой массив, ослаблена отверстием, которое подкреплено кольцом S_1 , моделирующим обделку тоннеля. Деформационные свойства материалов среды S_0 и кольца S_1 характеризуются модулями деформации E_j и коэффициентами Пуассона ν_j ($j = 0, 1$).

Следуя основным принципам механики подземных сооружений [20], общий подход к решению поставленных задач заключается в представлении напряженного состояния моделирующей грунтовой массив полубесконечной среды S_0 , как суммы полей начальных и дополнительных напряжений и деформаций. Принимается, что поля начальных напряжений и деформаций (обусловленные как естественными, так и техногенными факторами), формирующиеся в грунтовой массиве в результате статического приложения рассматриваемой нагрузки, не связаны с сооружением выработки и являются известными, поскольку могут быть определены экспериментально или на основе решений соответствующих задач теории упругости для сплошной полубесконечной среды S_0 . При этом начальные деформации, обусловленные естественными воздействиями, из рассмотрения исключаются [20]. Дополнительные напряжения и деформации, обусловленные влиянием проходки и крепления выработки, которая моделируется в расчетной схеме (рис.1) подкрепленным отверстием, отыскиваются в ходе решения задачи.

Собственный вес грунта и техногенные воздействия моделируются на единой методологической основе путем введения в рассмотрение соответствующих полей начальных напряжений. Так, действие собственного веса грунта моделируется полем начальных напряжений $\sigma_x^{(0)(0)}$, $\sigma_y^{(0)(0)}$, линейно зависящих от координаты y . Аналогичным образом, вводя в рассмотрение соответствующие поля напряжений, обусловленные действием сил P_1 , P_2 , P_3 , моделируется влияние на массив свай-стоек, а действием соответствующих распределенных нагрузок – висячих свай (q_1), заглубленных фундаментов (q_2), сооружений и транспортных средств на поверхности (q_3).

Граничные условия на линии контакта L_0 отражают непрерывность векторов полных нормальных и касательных напряжений и деформаций в соответствующих точ-

ках средах S_0 и кольца S_1 . Условия на свободных от нагрузки границах L_1 и L' отражают отсутствие нормальных и касательных напряжений. При рассмотрении нагрузки q_3 в граничном условии на L' задается соответствующее нормальное равномерно распределенное давление.

Следует отметить, что до настоящего времени в геомеханике имелись решения частных задач, связанных с расчетом подземных сооружений мелкого заложения на действие гравитационных сил или нагрузок на земной поверхности [18,19], при этом проблема оценки влияния техногенных полей напряжений на подземные сооружения неглубокого заложения рассматривается впервые.

С целью построения соответствующего метода расчета подземных конструкций рассматриваются аналитические решения ряда плоских задач теории упругости, основанные на применении метода Н.И.Мусхелишвили [20]. С этой целью вводятся в рассмотрение комплексные потенциалы $\phi_j(z)$, $\psi_j(z)$ ($j = 0, 1$), полностью определяющие напряженно-деформированное состояние рассматриваемых точек $z=x+iy$ (i - мнимая единица) полубесконечной среды S_0 ($j = 0$) и кольца S_1 ($j = 1$). В результате осуществляется переход к краевым задачам теории функций комплексного переменного (ТФКП), связанных с отысканием двух пар функций, которые могут быть представлены в виде рядов Лорана [20].

В отличие от принятых ранее подходов [18 - 23] к решению аналогичных задач, в настоящей работе в качестве искомых принимаются функции $\Phi_j(z)$, $\Psi_j(z)$, определяемые соотношениями

$$\Phi_j(z) = \phi'_j(z); \quad \Psi_j(z) = \psi'_j(z) \quad (j = 0, 1). \quad (1)$$

При этом краевые условия рассматриваемых задач принимают вид:

- на L' ($t = x + iH$)

$$\Phi_0(t) + \overline{\Phi_0(t)} + t\Phi'_0(t) + \Psi_0(t) = 0; \quad (2)$$

- на L_0 ($t = R_0\sigma$)

$$\begin{aligned} \overline{\Phi_1(t)} + \Phi_1(t) - e^{2i\theta} [\overline{t\Phi'_1(t)} + \Psi_1(t)] = \\ = \overline{\Phi_0(t)} + \Phi_0(t) - e^{2i\theta} [\overline{t\Phi'_0(t)} + \Psi_0(t)] + f_1(t); \\ \kappa_1 \overline{\Phi_1(t)} - \Phi_1(t) + e^{2i\theta} [\overline{t\Phi'_1(t)} + \Psi_1(t)] = \end{aligned} \quad (3)$$

$$= \frac{\mu_1}{\mu_0} \left[\kappa_0 \overline{\Phi_0(t)} - \Phi_0(t) + e^{2i\theta} \overline{t\Phi'_0(t)} + e^{2i\theta} \Psi_0(t) \right] + f_2(t);$$

- на L_1 ($t = R_1\sigma$)

$$\Phi_1(t) + \overline{\Phi_1(t)} - e^{2i\theta} [\overline{t\Phi'_1(t)} + \Psi_1(t)] = 0. \quad (4)$$

Здесь t – аффикс точки рассматриваемого контура; $\sigma = e^{i\theta}$ – точка единичной окружности (θ – угловая координата соответствующей точки); μ_j ($j = 0, 1$) – параметры Ламе; κ_j – коэффициенты вида напряженного состояния; $f_k(t)$ ($k = 1, 2$) – комплексные функции, соответствующие рассматриваемым воздействиям.

Поскольку определить функции $f_k(t)$ с использованием известных [21, 24] решений задач о действии сосредоточенных и распределенных нагрузок (рис. 2) в упругой полуплоскости не представляется возможным, в работе получены соответствующие решения выражения с использованием метода Н.И.Мусхелишвили.

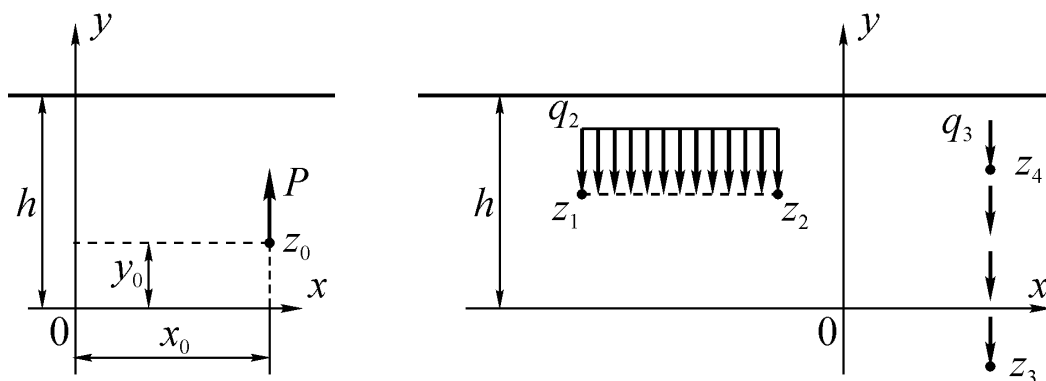


Рис. 1. Расчетная схема для определения напряженно – деформированного состояния упругой полуплоскости, нагруженной сосредоточенной силой (а) и распределенными нагрузками (б)

Fig. 1. The design scheme for determining stress-strain state of elastic half-plane loaded with a concentrated force (a) and distributed loads (b)

Так, выражения для комплексных потенциалов, определяющих напряженно-деформированное состояние в произвольной точке z полуплоскости (рис. 2, а), нагруженной в произвольной точке $z_0 = x_0 + iy_0$ сосредоточенной силой P , принимают вид:

$$\Phi(z) = -\frac{iP}{2\pi(1+\kappa_0)} \left[\frac{1}{z-z_0} + \frac{\kappa_0}{z-\bar{z}_0-2ih} - \frac{2i(h-y_0)}{(z-\bar{z}_0-2ih)^2} \right]; \quad (5)$$

$$\Psi(z) = -\frac{iP}{2\pi(1+\kappa_0)} \left[\frac{\kappa_0}{z-z_0} + \frac{\bar{z}_0}{(z-z_0)^2} + \frac{1}{z-\bar{z}_0-2ih} + \frac{\kappa_0\bar{z}_0-2i(h-y_0)}{(z-\bar{z}_0-2ih)^2} - \frac{4i(h-y_0)\bar{z}_0}{(z-\bar{z}_0-2ih)^3} \right].$$

Очевидно, что проинтегрировав выражения (5), можно записать выражения для комплексных потенциалов в решениях задач о действии распределенных нагрузок, показанных на рис. 2,б.

После отыскания функций $f_k(t)$, входящих в граничные условия (3), поставленные выше задачи были решены с использованием свойств интегралов типа Коши и комплексных рядов.

Полученные решения реализованы в виде программного обеспечения, позволяющего производить расчет круговых обделок тоннелей мелкого заложения с учетом техногенных воздействий на вмещающий грунтовый массив.

С целью приближенного учета размера фундамента в направлении, перпендикулярном плоскости сечения тоннеля, результаты расчета умножаются на коэффициент приведения $k < 1$. Указанный коэффициент определяется подобно тому, как сделано в работах [21,22], и вычисляется как отношение вертикальных напряжений в точке сплошного полупространства, соответствующей центру рассматриваемого сечения тоннеля, полученных из решения задач о напряженном состоянии полупространства, нагруженного приложенными внутри него нагрузками, распределенными по заданной площади и по полосе бесконечной длины, параллельной оси тоннеля.

При расчете на действие собственного веса пород и нагрузок от фундаментов сооружений, построенных задолго до проходки тоннеля, необходимо учитывать,

что перемещения в грунтовом массиве к этому времени уже реализовались [23], и функция $f_2(t)$ полагается равной нулю. Кроме того, в соответствии с подходом, изложенным в работах [18, 23], с целью учета пространственного характера нагружения подземной конструкции, обусловленного отставанием ее возведения от забоя выработки, напряжения в кольце S_1 , полученные из решений соответствующих задач, должны быть умножены на корректирующий множитель $\alpha^* < 1$.

Практическое применение предложенного подхода

С целью апробации предложенного подхода была выполнена оценка напряженного состояния обделки двухпутного перегонного тоннеля метрополитена, пройденного под Невским заливом и западной оконечностью Васильевского острова в г. Санкт-Петербург.

Проходка тоннеля осуществлялась с помощью тоннелепроходческого механизированного комплекса. Обделка тоннеля наружным диаметром 10,3 м изготовлена из железобетонных блоков толщиной 450 мм. Материал блоков – бетон В60 с модулем деформации $E_1 = 40000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu_1 = 0,25$. Вмещающие грунты представлены глинами с модулем деформации $E_0 = 200$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu_0 = 0,35$.

Поскольку рассматриваемое сооружение имеет повышенный уровень ответственности, а горно-геологические условия строительства являются весьма сложными, при проектировании были предусмотрены мероприятия, позволяющие осуществлять постоянный мониторинг состояния подземной конструкции. С этой целью в 14-и контрольных сечениях обделки по трассе тоннеля было установлено 28 колец, блоки которых оборудованы струнными деформометрами. При этом одно из контрольных сечений по трассе тоннеля (кольца №№ 2329, 2330) расположено вблизи опор Западного скоростного диаметра Санкт-Петербурга (ЗСД). Соответствующий участок схематично изображен на рис. 2. Здесь цифрами показаны отметки глубин Невского залива. Расположение датчиков в кольцах обделки показано на рис. 3. Значения нагрузок на свайные опоры ЗСД приводятся в таблице.

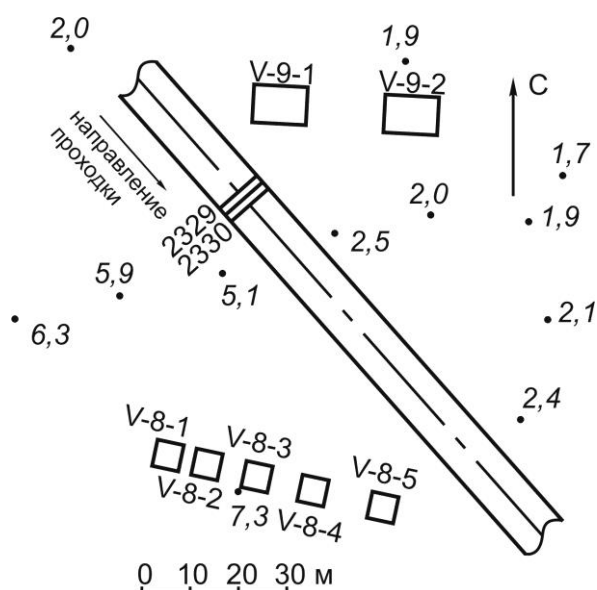


Рис. 2. Схема расположения опор относительно тоннеля
Fig. 2. Location of the supports relative to the tunnel

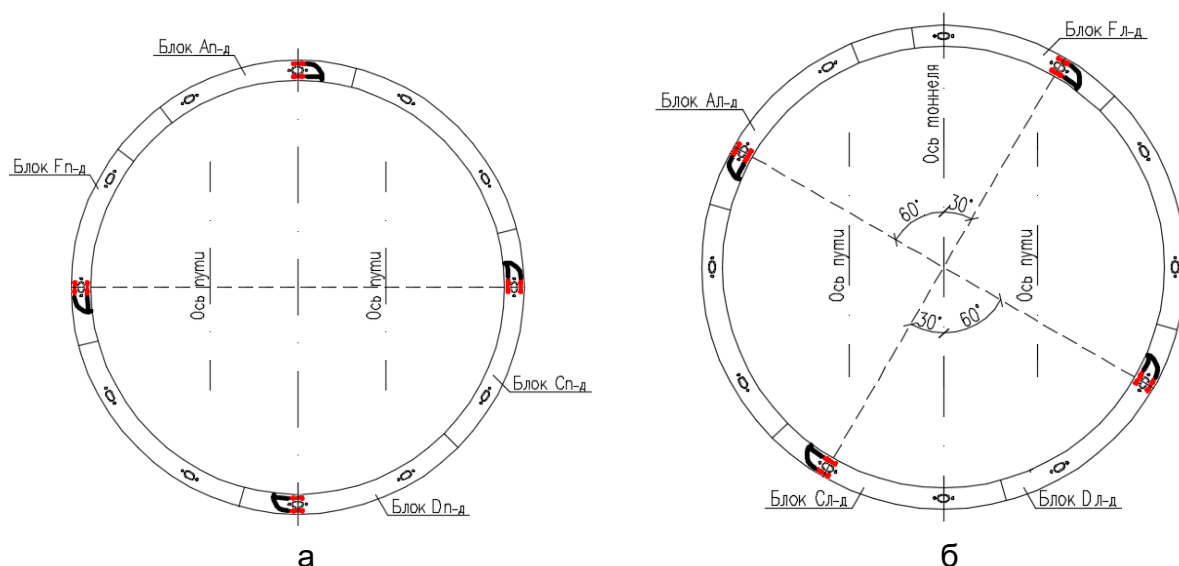


Рис. 3. Расположение датчиков в обделке тоннеля в кольцах 2329 (а) и 2330 (б)
Fig. 3. Locations of tunnel linings sensors in rings 2329 (a), 2330 (b)

Таблица

Проектные величины нагрузок на свайные опоры ЗСД

Опора	Максимальная расчётная нагрузка, МН	Число свай
V-8-1	42,6	5
V-8-2	44,0	5
V-8-3	15,6	5
V-8-4	15,6	5
V-8-5	15,6	5
V-9-1	21,1	12
V-9-2	21,1	12

После окончания строительства подземного сооружения методом намыва уровень дневной поверхности над тоннелем был поднят до отметки +3,1 м. При этом произошло перераспределение напряжений в обделке, которое было зафиксировано датчиками, установленными в подземной конструкции.

Разработанный метод расчета позволил выполнить оценку напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля в рассматриваемом сечении и сопоставить полученные результатов с имеющимися данными натурных наблюдений.

Давление воды на дно водоема до проведения работ по намыву и вес намывного грунта моделировались с применением общей расчетной схемы (рис. 1) путем приложения нагрузок к границе полуплоскости соответственно до и после образования подкрепленного отверстия. При этом, поскольку глубина залива слева и справа от трассы тоннеля несколько отличается (см. рис. 2), различается также интенсивность нагрузок, приложенных к границе полуплоскости слева и справа от оси у.

Нагрузки, передаваемые на грунт от опор, моделировались 17-ю сосредоточенными силами, расчетные значения которых определялись с учетом пространственного характера расположения нижних частей свай относительно сечения. Положение и величины расчетных нагрузок показаны на рис. 4.

Корректирующий множитель, учитывающий отставание возведения крепи от забоя, при расчетах был принят равным $\alpha^* = 0,6$ [23].

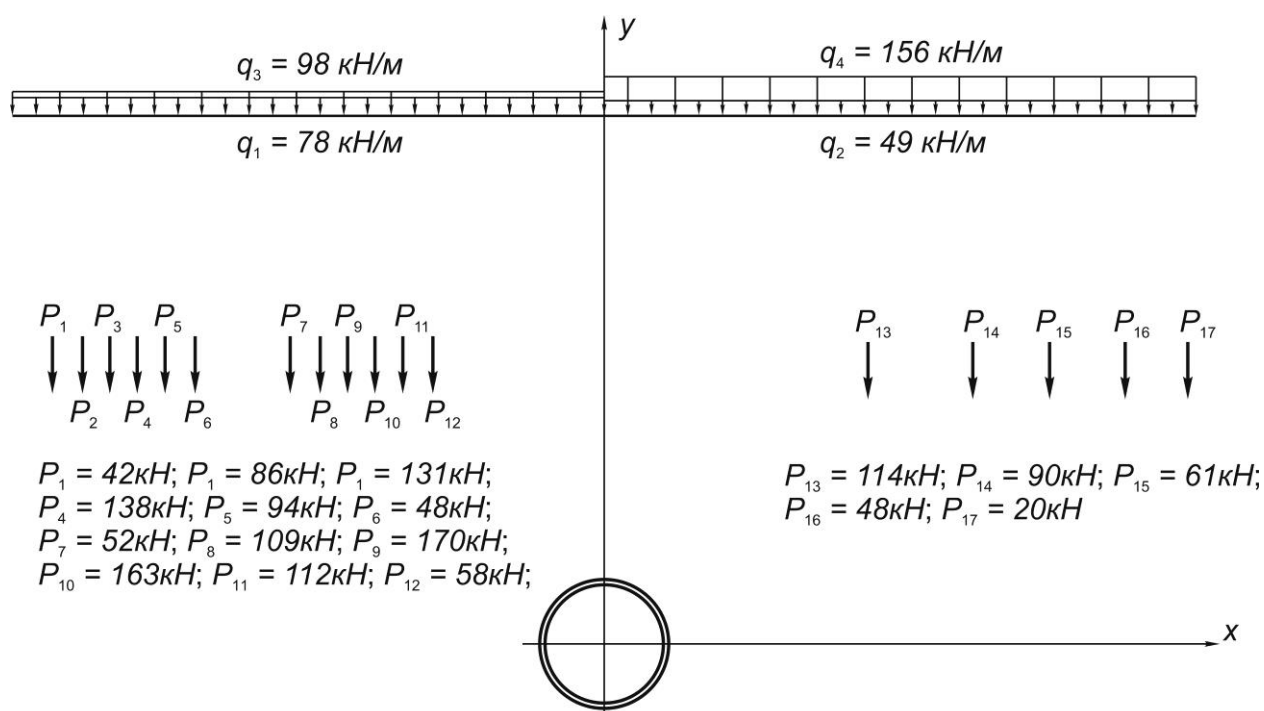


Рис. 4. Схема расположения расчетных нагрузок
Fig. 4. Scheme of design loads

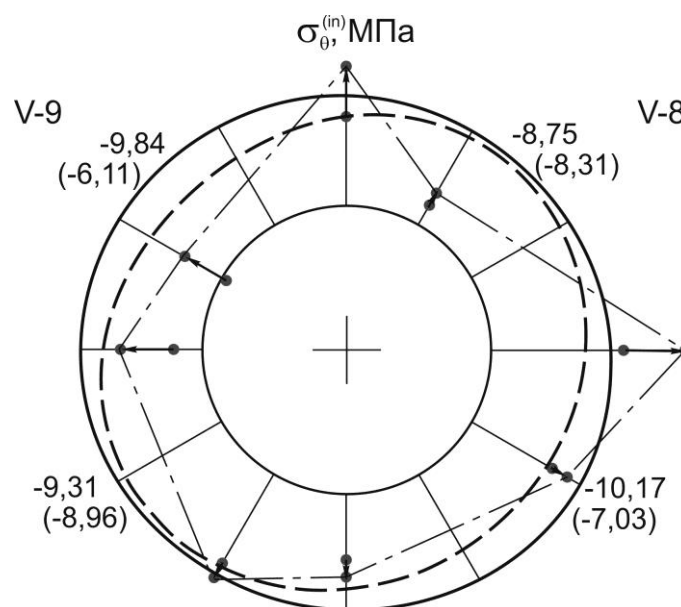
Результаты расчета, сравнение с данными натурных измерений

Расчетные эпюры нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем и наружном контурах обделки приведены на рис. 5 а, б. Рассматривались следующие сочетания нагрузок:

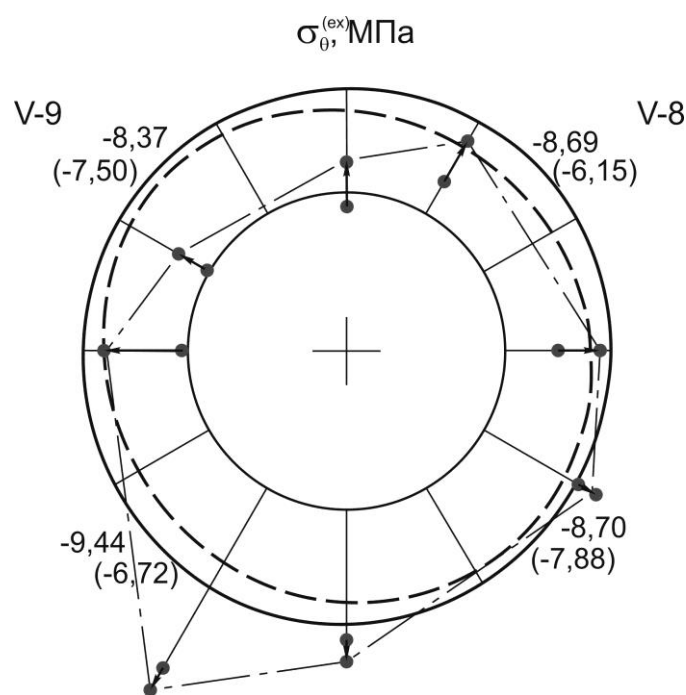
- 1) собственный вес грунта, давление воды на дно водоема и нагрузки от опор ЗСД (пунктирные линии);
- 2) собственный вес грунта после подъема высотных отметок земной поверхности, нагрузки от опор ЗСД (сплошные линии).

Для сравнения на рис. 5 точками показаны измеренные значения напряжений в обделке. Изменение напряжений, вызванное подъемом отметок земной поверхности, показано стрелками.

Анализ приведенных на рис. 5 результатов позволил сделать вывод об удовлетворительном согласовании данных измерений и расчета. Так, из 32-х показаний датчиков 17 близки к расчётным значениям, и только 3 – несколько их превышают.



а



б

Рис. 5. Окружные напряжения в обделке тоннеля после профилирования поверхности: а – на внутреннем контуре; б – на наружном контуре

Fig. 5. Circumferential stresses in the tunnel lining after surface profiling: а – along internal outline; б – along external outline

Обсуждение результатов

Полученные в ходе выполненных исследований результаты показали, что техногенные поля напряжений в массиве грунта, обусловленные наличием опор путепровода ЗСД, а также перепрофилированием земной поверхности, оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние подземных конструкций. При этом наличие заглубленных опор приводит к увеличению максимальных сжимающих напряжений в обделке на 13%, а изменение высотных отметок поверхности – на 30%.

Не смотря на то, что в рассматриваемом случае сваи расположены достаточно далеко от оси тоннеля, их влияние на напряженное состояние обделки проявляется весьма значительно и должно учитываться при проектировании. То же можно сказать об изменении высотных отметок земной поверхности.

Заключение

В работе предложен новый подход к учету влияния техногенных воздействий на напряженно-деформированное состояние подземных конструкций. В основу подхода положено представление о техногенных воздействиях как дополнительных полях напряжений, формирующихся во вмещающем грунтовом массиве. В качестве таких воздействий рассматриваются нагрузки, обусловленные весом зданий и сооружений на земной поверхности, проведением строительных работ и др. С целью реализации данного подхода получены аналитические решения ряда плоских контактных задач теории упругости для кругового кольца, подкрепляющего отверстие в полуплоскости при наличии полей напряжений, определяемых в зависимости от рассматриваемых воздействий. На основе полученных решений разработан метод расчета обделок тоннелей, реализованный в виде компьютерного программного комплекса. Возможности разработанного метода проиллюстрированы на примере расчета обделки перегонного тоннеля, сооружаемого в зоне влияния опор путепровода, и строительных работ, связанных с изменением высотных отметок земной поверхности. Удовлетворительное согласование полученных результаты с данными натурных измерений свидетельствует о возможности практического применения предложенного метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chen R. P., Meng F. Y. Influence of a nearby large excavation on existing metro in soft soils // Japanese Geotechnical Society Special Publication, January 2016, pp. 1567-1572. DOI: 10.3208/jgssp.ATC6-10.
2. Meng F. Y., Chen R. P., Xu Y., Wu K., Wu H.N., Liu Y. Contributions to responses of existing tunnel subjected to nearby excavation: A review // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022, no. 119, 104195. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104195.
3. Ye S., Zhao Z., Wang D. Deformation analysis and safety assessment of existing metro tunnels affected by excavation of a foundation pit // Underground Space. 2021. No 6. pp. 421-431. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.06.002.
4. Huang F., Zhang M., Wang F., Ling T., Yang X. The failure mechanism of surrounding rock around an existing shield tunnel induced by an adjacent excavation // Computers and Geotechnics. 2020, no 117, 103236. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103236.
5. Панкратенко А. Н., Цюпа Д. А. Обоснование технологических решений по сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро, попадающих в зону влияния нового строительства // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 2. – С. 367-373.
6. Кавказский В. Н., Ледяев А. П., Мельник Я. В., Графов Д. Ю. Влияние объектов культурного наследия на коллекторные тоннели в Санкт-Петербурге // Путьевой навигатор. – 2023. – № 54. – С. 22-31.
7. Meng F. Y., Chen R. P., Liu S. L., Wu H. N. Centrifuge modeling of ground and tunnel responses to nearby excavation in soft soil // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, no 147(3), 04020178 DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002473.
8. Shi J., Fu Z., Gu W. Investigation of geometric effects on three-dimensional tunnel deformation mechanisms due to basement excavation // Computers and Geotechnics. 2019, no. 106, pp. 108–116. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.10.019.

9. Лебедев М.О., Егоров Г.Д. Геотехнические исследования при сооружении эскалаторных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. - № 10. С. – 146-159. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-146-159.
10. Месхи Б. Ч., Плешко М. С., Войнов И. В., Кайшау Ж. Ж. 3. Обеспечение безопасной эксплуатации транспортных тоннелей на основе прогнозного моделирования интенсивных геомеханических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. – № 8. – С. 86-96.
11. Wei G. Measurement and analysis of impact of foundation pit excavation on below existed shield tunnels // Rock and Soil Mechanics, 2013, no. 34 (5), pp. 1421-1428 [in Chinese].
12. Zhuang Y., Cui X., Hu S. Numerical simulation and simplified analytical method to evaluate the displacement of adjacent tunnels caused by excavation // Tunnelling and Underground Space Technology. 2023, no. 132, 104879. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104879.
13. Qiu J. T., Jiang J., Zhou X. J., Zhang Y. F., Pan Y. D. Analytical solution for evaluating deformation response of existing metro tunnel due to excavation of adjacent foundation pit // Journal of Central South University. 2021, no. 28, pp. 1888–1900. DOI: 10.1007/s11771-021-4737-3.
14. Liu J., Shi C., Lei M., Cao C., Lin Y. Improved analytical method for evaluating the responses of a shield tunnel to adjacent excavations and its application // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020, no. 98, 103339. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103339.
15. Liang R., Xia T., Huang M., Lin C.. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect // Computers and Geotechnics, 2017, no. 81, pp. 167–187.
16. Сокорнов А.А., Коньков А.Н., Новиков А.Л., Козин Е.Г. Определение добавочного давления на подземные сооружения метрополитена от наземного строительства // Путь навигатор. – 2020. – № 42. – С. 36-41.
17. Sokornov A.A., Konkov A.N., Novikov A.L., Benin A.V. Additional pressure distribution on subway tunnels from ground construction // Civil and Environmental Engineering. 2022, vol. 18, no. 1, pp. 185-194. DOI: 10.2478/cee-2022-0017.
18. Анциферов С. В., Фомин А. В. Напряженное состояние крепи параллельных выработок, сооруженных вблизи склона, от массы расположенных на поверхности объектов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 375-391. DOI:10.46689/2218-5194-2020-1-1-375-391.
19. Воронина И. Ю., Саммаль А. С., Залесский К. Е. Геомеханическая оценка влияния зоны укрепленных пород на несущую способность обделки подводного тоннеля // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 1. – С. 462-471. DOI: 10.46689/2218-5194-2023-1-1-462-471.
20. Muskhelishvili N. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity, Noordhoff, Groningen, 1963, 732 p.
21. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов /учеб. пособие. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005, 220с.
22. Poulos H. G., Davis E. H. Elastic solutions for soil and rock mechanics. New York, John Wiley and Sons, 1974. 411 p.
23. Булычев Н. С., Фотиева Н. Н., Стрельцов Е. В. Проектирование и расчет крепи капитальных горных выработок. – М.: Недра, 1986. – 278 с.

REFERENCES

1. Chen R. P., Meng F. Y. Influence of a nearby large excavation on existing metro in soft soils // Japanese Geotechnical Society Special Publication, January 2016, pp. 1567–1572. DOI: 10.3208/jgssp.ATC6-10.
2. Meng F. Y., Chen R. P., Xu Y., Wu K., Wu H.N., Liu Y. Contributions to responses of existing tunnel subjected to nearby excavation: A review // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022, no. 119, 104195. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104195.
3. Ye S., Zhao Z., Wang D. Deformation analysis and safety assessment of existing metro tunnels affected by excavation of a foundation pit // Underground Space. 2021. No 6. pp. 421–431. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.06.002.
4. Huang F., Zhang M., Wang F., Ling T., Yang X. The failure mechanism of surrounding rock around an existing shield tunnel induced by an adjacent excavation // Computers and Geotechnics. 2020, no 117, 103236. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103236.
5. Pankratenko A. N., Tsyupa D. A. Substantiation of technological solutions for the safety and operational reliability of existing metro tunnels falling into the zone of influence of new construction, Proceedings of Tula State University - Sciences of Earth, 2023, no. 2, pp. 367-373. [in Russ].
6. Kavkazsky V. N., Ledyayev A. P., Melnik Yu. V. Grafov D. Yu. The influence of cultural heritage sites on collector tunnels in St. Petersburg. Putevoj navigator, 2032, no. 54, pp. 22-31. [in Russ].
7. Meng F. Y., Chen R. P., Liu S. L., Wu H. N. Centrifuge modeling of ground and tunnel responses to nearby excavation in soft soil // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, no 147(3), 04020178 DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002473
8. Shi J., Fu Z., Gu W. Investigation of geometric effects on three-dimensional tunnel deformation mechanisms due to basement excavation // Computers and Geotechnics. 2019, no. 106, pp. 108–116. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.10.019.
9. Lebedev M.O., Egorov G.D. Geotechnical monitoring in construction of escalator tunnels. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull., 2019, no. 10, pp. 146-159. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-146-159.[in Russ].
10. Meskhi B. CH., Pleshko M. S., Voinov I. V., Caixao J. J. Z. Safe operation of transportation tunnels based on predictive modeling of active geomechanical processes. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull., 2020, no., 8, pp. 86-96. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-86-96. [in Russ].
11. Wei G. Measurement and analysis of impact of foundation pit excavation on below existed shield tunnels // Rock and Soil Mechanics, 2013, no. 34 (5), pp. 1421-1428 [in Chinese].
12. Zhuang Y., Cui X., Hu S. Numerical simulation and simplified analytical method to evaluate the displacement of adjacent tunnels caused by excavation // Tunnelling and Underground Space Technology. 2023, no. 132, 104879. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104879.
13. Qiu J. T., Jiang J., Zhou X. J., Zhang Y. F., Pan Y. D. Analytical solution for evaluating deformation response of existing metro tunnel due to excavation of adjacent foundation pit // Journal of Central South University. 2021, no. 28, pp. 1888–1900. DOI: 10.1007/s11771-021-4737-3.
14. Liu J., Shi C., Lei M., Cao C., Lin Y. Improved analytical method for evaluating the responses of a shield tunnel to adjacent excavations and its application // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020, no. 98, 103339. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103339.
15. Liang R., Xia T., Huang M., Lin C.. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect // Computers and Geotechnics, 2017, no. 81, pp. 167–187.

16. Sokornov A. A., Konkov A. N., Novikov A. L., Kozin E. G. Determination of additional pressure on underground subway structures from surface construction. *Putevoj navigator*, 2020, no. 42, pp. C. 36-41. [in Russ].
17. Sokornov A.A., Konkov A.N., Novikov A.L., Benin A.V. Additional pressure distribution on subway tunnels from ground construction // *Civil and Environmental Engineering*. 2022, vol. 18, no. 1, pp. 185-194. DOI: 10.2478/cee-2022-0017.
18. Antsiferov S. V., Fomin A. V. The stress state of the support of parallel workings constructed near the slope, from the weight of objects located on the surface. *Proceedings of Tula State University - Sciences of Earth*, 2020, no. 1, pp. 375-391. DOI:10.46689/2218-5194-2020-1-1-375-391. [in Russ].
19. Voronina I. YU., Sammal A. S., Zalessky K. E. Geomechanical assessment of the influence strengthening rocks zone on underwater tunnel linings bearing capacity// *Proceedings of Tula State University - Sciences of Earth*, 2023, no. 1, pp. 462-471. DOI: 10.46689/2218-5194-2023-1-1-462-471. [in Russ].
20. Muskhelishvili N. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity, Noordhoff, Groningen, 1963, 732 p.
21. Ter-Martirosyan Z.G. Soil mechanics / textbook. allowance. M.: Publishing house of the Association of Construction Universities, 2005., 220c.
22. Poulos H. G., Davis E. H. Elastic solutions for soil and rock mechanics. New York, John Wiley and Sons, 1974. 411 p.
23. Bulychev N. S., Fotieva N. N., Strel'cov E. V. Design and calculation of capital mining supports, Moscow, Nedra, 1986, 278 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Михаил Олегович – канд. техн. наук, доцент, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе, [http://orcid.org/ 0000-0002-7749-442X](http://orcid.org/0000-0002-7749-442X) ОАО «Научно-исследовательский проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Московская, д. 2, Россия, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru.

Саммал Андрей Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, [http://orcid.org/ 0000-0003-0615-1718](http://orcid.org/0000-0003-0615-1718), ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, Россия, e-mail: assammal@mail.ru.

Деев Петр Вячеславович – д-р техн. наук, <http://orcid.org/0000-0001-8655-2428>, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, Россия, e-mail: dodysya@yandex.ru.

Анциферов Сергей Владимирович – д-р техн. наук, доцент <http://orcid.org/0000-0001-8571-2258>, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, Россия, e-mail: antsser@mail.ru.

M.O. Lebedev, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Deputy General Director for Research Activities, Open Joint Stock Company Scientific, Research, Design and Surveying Institute «Lenmetrogiprotrans», 191002, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru.

A.S. Sammal, Doct.Sci.(Eng.), Professor, Tula State University, 300012, Tula, Russia, e-mail: assammal@mail.ru.

P.V. Deev, Doct.Sci.(Eng.), Tula State University, 300012, Tula, Russia, e-mail: dodysya@yandex.ru.

S.V. Antziferov, Doct.Sci.(Eng.), Assistant Professor, Tula State University, 300012, Tula, Russia, e-mail: antsser@mail.ru.

Для контактов: Лебедев Михаил Олегович, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru

