



ENGINEER

international scientific journal

SPECIAL ISSUE

E-ISSN

3030-3893

ISSN

3060-5172



SLIB.UZ
Scientific library of Uzbekistan



A bridge between science and innovation



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



ENGINEER

A bridge between science and innovation

E-ISSN: 3030-3893

ISSN: 3060-5172

SPECIAL ISSUE

16-february, 2026



engineer.tstu.uz

**ABDURAXMON ASIMOVICH ISHANXODJAYEV TAVALLUDINING
85 YILLIGIGA BAG‘ISHLANGAN
“TRANSPORT INSHOOTLARI: ZAMONAVIY TEXNOLOGIYALAR,
SEYSMIK BARQARORLIK”
MAVZUSIDAGI XALQARO ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
ILMIY ISHLARI TO‘PLAMI**

Toshkent davlat transport universiteti texnika fanlari doktori, professor, transport qurilishi sohasida taniqli olim, fan va texnika sohasidagi Abu Rayhon Beruniy nomli O‘zbekiston Davlat mukofoti laureati, “Shuxrat belgisi” ordeni, “Sharafli mehnati uchun” medali, “Oliy talim fidoiysi”, Oliy talim alochisi”, “SSSR ixtirochisi”, “Yo‘l ustalarning ustozlari”, “Seysmik xavfsizlik sohasi alochisi” ko‘krak nishonlari sohibi **Abduraxmon Asimovich Ishanxodjayev tavalludining 85 yilligiga bag‘islangan “Transport inshootlari: zamonaviy texnologiyalar, seysmik barqarorlik”** mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya ilmiy ishlari to‘plami chop etildi.

Abduraxmon Asimovich 100 dan ortiq ilmiy asarlar, shu jumladan, 2 ta monografiya, 2 ta darslik, 18 ta chet elda chop etilgan ilmiy maqola va ishlab chiqarishga tadbiiq etilgan 6 ta ixtiroga berilgan guvohnoma va patentlar muallifidir. Uning ilmiy maslahatchiligi va ilmiy rahbarligida 2 ta doktorlik, 8 ta nomzodlik va 4 ta texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) ilmiy darajalariga dissertatsiyalar yoqlandi, ko‘p sonli ilmiy-tadqiqot mavzulari – fundamental va amaliy Ilmiy grantlar, yo‘l-ko‘prik qurilishi bo‘yicha Respublika va soha me‘yoriy hujjatlari yaratganlar.

Ishanxodjayev Abduraxmon Asimovich 1962 yilda Toshkent temir yo‘l muhandislari institutini “Sanoat va fuqaro qurilishi” mutaxassisligi bo‘yicha tugatib, bir yil O‘zbekiston suv xo‘jaligi Davlat loyiha instituti muhandisi, to‘rt yil “Toshshaxarqurilish Bosh Boshqarmasi” qurilish tashkilotlarida qurilish ustasi va ish bajaruvchi lavozimlarida ishladi. Shu davrda u hozirgi Respublika Prezidenti devoni binosi qurilishida ishtirok etdi, Toshkent viloyati Bo‘stonliq rayoni “Chimyon” dam olish zonasida tiklanayotgan “Quyoshli” pioner lager qurilishiga rahbarlik qildi. Nihoyat, u 5-yillik loyiha va ishlab chiqarish tajribasiga ega mutaxassis sifatida 1967-yil dekabrda O‘zbekiston Fanlar Akademiyasi mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutiga, ushbu institut direktori, o‘sha paytda fan nomzodi, keyinchalik akademik Tursunboy Rashidov ilmiy rahbarligida aspiranturaga kiradi va keyingi 20-yil davomida kichik va katta ilmiy hodim, laboratoriya mudiri lavozimlarida faoliyat ko‘rsatdi.

Shu davrda uning bevosita rahbarligi va ishtirokida O‘zbekiston Fanlar Akademiyasi mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutida dunyoda yagona “Metropolitanlar zilzilabardoshligi” laboratoriyasi tashkil etildi. Ushbu laboratoriya Toshkent metropoliteni Chilonzor metro yo‘lini noqulay grunt sharoitlari va yuqori seysmik zonada loyihalash va qurishda, metro qurilishi tajribasida birinchi bo‘lib yirik yig‘ma temirbeton elementlardan tiklanadigan yurish va bekat tonnellarining yangi, zilzilabardosh konstruksiyalari yaratish va tadbiiq etishda faol qatnashdi. Toshkent metrosi Chilonzor yo‘lining qurilgan bo‘laklarida ulkan eksperimental tadqiqotlar o‘tkazildi, metro tajribasida birinchi bo‘lib muhandis-seysmometrik kuzatuvlar tashkil qilindi. Laboratoriya ilmiy xodimlari va izlanuvchlaridan 10 dan ortiq kishi nomzodlik va doktorlik dissertatsiyalari yoqladilar. Kafedrada bajarilgan ilmiy-tadqiqotlar natijalarining ishlab chiqarishga tadbiiqidanda hosil bo‘lgan katta miqdordagi iqtisodiy samara institut va O‘zbekiston Fanlar Akademiyasi hisobotlarida qayd etildi.



Ustozimiz 30 yildan ortiq muddatda rahbarlik qilgan Toshkent avtomobil-yo'llar instituti "Ko'priklar va transport tonnelli" kafedrasida O'zbekiston Respublikasi, shuningdek, Osiyo, Afrika va Lotin Amerikasi mamlakatlari uchun ko'priklar bo'yicha oliy malumotli kadrlar tayyorladilar. Shuni qayd etish lozimki, professor Ishanxodjaev Abduraxmon Asimovich turli yillarda Tojikiston va Qirg'iziston Respublikalari hududlarida, Armaniston Respublikasining Spitak shahrida ro'y bergan kuchli zilzilalar oqibatlarini o'rganish va tahlil qilishda, sobiq Ittifoq Fanlar Akademiyasi prezidiumi qoshidagi seysmologiya va zilzilabardosh qurilish bo'yicha idoralararo kengash azosi sifatida faol ishtirok etdi. Keyingi yillarda u Toshkent shahri va Respublikada qurilayotgan ulkan transport inshootlari konstruksiyalari, shu jumladan Toshkent metropoliteni yer usti xalqa yo'li konstruksiyalarini ekspertiza qilish jarayonlarida ham bevosita ishtirok etdi.

Ishanxodjaev Abduraxmon Asimovich 50 yildan ortiq davrda ilmiy darajalar beruvchi ixtisoslashgan va ilmiy kengashlarning raisi, ilmiy kotibi, a'zosi va ushbu kengashlar qoshidagi ilmiy seminar raisi sifatida 300 dan ortiq mutaxassislarning doktorlik, nomzodlik va falsafa doktori ilmiy darajasini olish jarayonida qatnashdi. Hozirda u Toshkent Davlat Transport Universiteti huzuridagi doktorlik dissertatsiyalari himoyasi bo'yicha ilmiy kengash a'zosi va ushbu ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, O'zbekiston mexanika jamiyatining kengashi a'zosi, Sharof Rashidov nomli Samarqand Davlat universiteti va O'zbekiston Fanlar Akademiyasi seysmologiya instituti qoshidagi doktorlik dissertatsiyalari himoyasi bo'yicha ilmiy kengashlar a'zosi sifatida ilmiy darajadagi mutaxassislar tayyorlashda faol ishtirok etmoqdalar.

Mazkur ilmiy-amaliy konferensiyaning maqsadi transport qurilishi sohasida olib borilayotgan zamonaviy ilmiy tadqiqotlar yo'nalishlarini muhokama qilish, jumladan ko'priklar va tunnellar qurilishi, metropolitenlar, yuqori seysmik hududlarda transport obyektlarining ishonchliligi va seysmik mustahkamligi, zamonaviy hisoblash va loyihalash usullari, hamda innovatsion muhandislik yechimlari bo'yicha ilmiy natijalar almashuvini ta'minlashdan iboratdir.

Konferensiyada O'zbekiston Respublikasi hamda xorijiy mamlakatlarning oliy o'quv yurtlari va ilmiy-tadqiqot institutlari olimlari, shuningdek, muhim ilmiy tadqiqot natijalariga ega bo'lgan ishlab chiqarish vakillari o'z ilmiy ishlari bilan ishtirok etdilar.

"Transport inshootlari: zamonaviy texnologiyalar, seysmik barqarorlik" mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyaning asosiy yo'nalishlari quyidagilardan iborat:

1. Transport inshootlari uchun zamonaviy konstruktiv yechimlar va materiallar;
2. Ko'priklar hamda yo'l o'tkazgichlarni diagnostika qilish, ta'mirlash va mustahkamlash texnologiyalari;
3. Seysmik hududlarda transport inshootlarini loyihalash va ekspluatatsiya qilishdagi dolzarb masalalar;
4. Ilg'or xorijiy tajriba, innovatsion yondashuvlar va amaliy tavsiyalar.

Ushbu ilmiy-ma'rifiy to'plam Abduraxmon Asimovich Ishanxodjaevning tabarruk 85 yoshga to'lishi munosabati bilan nashr etilib, unda transport qurilishi sohasida faoliyat yuritayotgan yetakchi olimlar, professor-o'qituvchilar va malakali mutaxassislarning ilmiy izlanishlari jamlangan. To'plamda transport qurilishining dolzarb muammolari, zamonaviy muhandislik yechimlari, ilmiy-nazariy va amaliy tadqiqot natijalari yoritilib, ushbu sohaning bugungi holati va istiqboldagi rivojlanish yo'nalishlari aks ettirilgan. Mazkur nashr Abduraxmon Asimovichning transport qurilishi faniga qo'shgan ulkan hissasiga nisbatan chuqur hurmat va e'tirof ramzi sifatida tayyorlangan.



Mutual influence of parallel tunnels in an elastic medium in the epicentral zone of an earthquake

I. Mirzaev^{1,2}^a, S.M. Gaynazarov³^b

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

²M.T. Urazbayev Institute of Mechanics and Seismic Resistance of Structures of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

³National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: When analyzing the interaction of parallel metro running tunnels in dynamic problems involving wave loading, it is necessary to limit the computational domain using artificial boundaries. This requires the formulation of boundary conditions that ensure transparency for both incoming external waves and internal waves reflected from structural elements. In this paper, exact non-reflecting boundary conditions are proposed. Based on the developed mathematical model, the behavior of tunnel linings under the action of longitudinal and shear waves in the epicentral zone of an earthquake is investigated. The numerical implementation is carried out using the finite element method and the Bathe time integration method. The influence of the distance between circular reinforced concrete linings under longitudinal and shear wave loading is studied. The calculation results demonstrate the high efficiency of the proposed transparent boundary conditions, which makes it possible to reliably investigate wave–structure interaction processes in underground structures under plane strain conditions.

Keywords: elastic medium, lining, transparent boundaries, wave propagation, finite element method, Bathe integration method

Взаимовлияние параллельных тоннелей в упругой среде в эпицентральной зоне землетрясения

И. Мирзаев^{1,2}^a, С.М. Гайназаров³^b

¹Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент Узбекистан

²Институт механики и сейсмостойкости сооружений имени М.Т. Уразбаева АН Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

³Национальный Университет Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация: При расчете взаимовлияния параллельных перегонных тоннелей метрополитена для решения динамических задач на волновые воздействия требуется ограничение области искусственными границами. При этом возникает необходимость задания таких условий на границах, которые обеспечили бы их прозрачность для прохождения внешних и отраженных от объектов внутренних волн. В данной статье предложены точные условия неотражения волн на границах. На основе предложенной математической модели выполнено исследование поведения обделок при воздействии продольных и сдвиговых волн в эпицентральной зоне землетрясения. Численная реализация выполнена методом конечных элементов и методом Бате по времени. Исследовано влияние расстояния между круговыми железобетонными обделками при воздействии продольных и сдвиговых волн. Приведены результаты расчетов, показывающие хорошее качество условий прозрачности на искусственных границах, что позволяет проводить достоверные исследования процессов воздействия волн на подземные сооружения в случае плоской деформации.

Ключевые слова: упругая среда, обделка, прозрачные границы, распространение волны, метод конечных элементов, метод интегрирования Бате

1. Введение

При расчете сооружений в грунтовой среде при динамических воздействиях одним из важных условий является учет не отражения волн от границы расчетной области. Это позволяет оптимально ограничить область расчета для эффективного анализа результатов при численных расчетах.

В работе [1] впервые рассматривается данная проблема и предлагаются формулы зависимости напряжений от скоростей частиц плоских волн на искусственных границах. Следует отметить, что условие Лайсмера и их модификации являются приближенными условиями на границах. Эти условия

^a <https://orcid.org/0000-0002-8616-9717>

^b <https://orcid.org/0009-0001-2535-1283>



дают хорошие результаты, когда нормаль к фронту волны с искусственной границей составляет прямой угол. В работе [2] для системы сооружение-основание использован учет волнового уноса энергии через неотражающую границу посредством использования условий Lysmer [1], с использованием метода конечных элементов. В статье [3] таким же способом использовался метод учета волнового уноса энергии при движении железнодорожного состава. В работе [4] исследована неоднородная плоская задача теории упругости с использованием метода конечных элементов в расчетах на распространение вибрации при прохождении поездов метро в параллельных тоннелях.

В статье [5] предложено использование фиктивной области с специальными свойствами поглощения волн, что является одним из решений проблемы не отражения на границах области. В этой статье связанная задача, включающая внутреннюю подобласть и поглощающие слои, реализуется через гетерогенные асинхронные интеграторы времени, что позволяет обрабатывать поглощающие слои с помощью явной схемы центральной разности. Представлен эталон для трехмерных явных асинхронных поглощающих слоев для моделирования неограниченных областей с помощью стандартного метода конечных элементов на основе перемещений.

В работе [6] предложен новый метод инверсии для реконструкции сложного некогерентного падающего волнового поля SH-волн в области, ограниченной волн поглощающими граничными условиями, с использованием метода оптимизации, ограниченной дифференциальным уравнением в частных производных.

Статья [7] является обзорной работой, в которой представлены различные модели, реализующие условия не отражения волн на границах ограниченной области. В статье [8] представлена новая процедура учета влияния свободного поля в модели сейсмического взаимодействия грунта и конструкции (SSSI) при использовании 8-узловых конечных элементов, ограниченных совместимыми поглощающими бесконечными элементами.

В статье [9] для одномерного волнового уравнения предложен метод получения прозрачных граничных условий и показана его численная реализация с использованием метода конечных разностей. Предложенный метод распространяется на трехмерное волновое уравнение с радиальной симметрией.

В работах [10], [11], [12] выполнен статический анализ напряженного состояния различных обделок тоннели метрополитена. Проведен анализ численных результатов в зависимости от глубины заложения тоннеля. В работе [13] рассмотрен расчет водопропускной туннели в грунте, усиленной бетоном с трех сторон, и выполнен частотный анализ с применением метода конечных элементов. В работе [14] представлен обзор динамического взаимодействия грунта и сооружения (SSI) для строительных конструкций и доступных методов моделирования для решения проблем SSI. Кроме того, освещены основные подходы к оценке проблем сейсмического взаимодействия грунта и сооружения с помощью широко используемых методов моделирования и вычислительных методов. Также обсуждаются и сравниваются сильные стороны, ограничения и случаи применения каждой модели.

В работе [15] предлагаются точные неотражающие граничные условия для внешних волновых уравнений с использованием на границах интегральных уравнений.

В работе [16] исследовано распространение продольной волны в грунте с насыпью на поверхности земли с учетом прозрачности искусственных границ. В ней авторами использовались условия прозрачности, с добавлением дополнительного члена, связанного с касательными напряжениями.

При недостаточно правильном моделировании условий неотражения внутренних волн на искусственных границах наблюдается дифракция волн, что приводит к появлению паразитических волн, нарушающих процесс распространения волн внутри ограниченной области. В статье [17] утверждено, что при падении волны на границу возникают нежелательные дифракционные процессы, когда вектор волновой нормали, определяющий направление распространения волны, составляет с искусственной границей менее 15 градусов.

В статье [18] представлен анализ поведения здания, подверженного сейсмическим возмущениям, с использованием методов модальной суперпозиции и прямого интегрирования. Реакция здания на сейсмическую нагрузку сравнивается с помощью спектров реакции. Авторы предложили наименее консервативный подход к расчету коэффициентов демпфирования Рэлея для анализа здания во временной области.

В статье [19] рассмотрено влияние сейсмического удара в спектрах реакции пола двух соседних железобетонных конструкций с неупругим поведением. Показано значительное влияние ударов на спектры ускорения пола, что увеличило распространение ускорений в более широком диапазоне периодов, особенно возбуждая периоды низкой и умеренной вибрации.

В результате анализа литературы до настоящего времени не встретились работы, которые бы точно разрешали условия не отражения волн на границах.

Данное исследование устанавливает точные условия прозрачности на границах, обеспечивая свободное прохождение волн и облегчая точное моделирование в ограниченной области

2. Методика исследования

В полуплоскости рассмотрено двумерное изотропное линейно упругое тело, ограниченное областью Ω , с включением в виде одной круговой обделки или двух круговых обделок (рис. 1). Плоская продольная или(и) поперечная волна в область Ω входит через границу AB, а условия на границах AC и BD должны компенсировать действие отброшенной части полуплоскости. Граница CD области Ω свободна от напряжений, т.е. на этой границе задано условие свободной поверхности. Внутри прямоугольной области могут быть расположены круговые обделки на разной глубине от свободной поверхности.



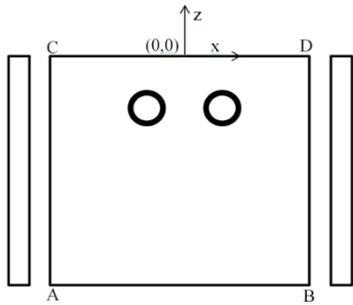


Рис. 1. Вид основной и вспомогательной областей

Для решения поставленной задачи используем слабую форму (вариационная форма) уравнений равновесия [20]:

$$\int_{\Omega} [\lambda \operatorname{div}(u) \operatorname{div}(\delta u) + 2\mu \varepsilon^T \delta \varepsilon - (r - \rho \dot{u} - c \dot{u}) \delta u] d\Omega - \int_{\Gamma} P \delta u d\Gamma = 0, \quad (1)$$

где P – вектор поверхностных усилий на единицу площади на границе области, ρ, c, r – плотность материала, параметр вязкости среды и вектор объемных сил, $u^T = \{u_x, u_z\}$ – вектор перемещений, ε – тензор деформаций, λ и μ – коэффициенты Ляме. Оси декартовых координат направлены: Ox – слева на право, Oz – снизу-вверх, начало координат расположено в центре свободной поверхности.

Прозрачные граничные условия выводятся применением точных решений для плоской волны в виде связи между деформациями и скоростями частиц, и подстановкой их в обобщенный закон Гука. Кроме этого, в полученных условиях используется решение одномерной плоской соответствующей динамической задачи для области без обделки.

Граничные условия, когда через границу АВ поступает в область Ω продольная и поперечная волны со скоростями частиц $f_p(t)$ и $f_s(t)$, следующие: условия прозрачности на АВ, имеют вид:

$$\begin{aligned} P_z &= -\sigma_{zz} = -c_p \rho \dot{u}_z - \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} + 2c_p \rho f_p(t); \\ P_x &= -\sigma_{xz} = -c_s \rho \dot{u}_x + 2c_s \rho f_s(t); \end{aligned} \quad (2)$$

условия не отражения на CD:

$$\begin{aligned} P_z &= \sigma_{zz} = -c_p \rho \dot{u}_z + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x}; \\ P_x &= \sigma_{xz} = -c_s \rho \dot{u}_x; \end{aligned} \quad (3)$$

или в случае свободной поверхности на CD:

$$P_z = \sigma_{zz} = 0; P_x = \sigma_{xz} = 0; \quad (4)$$

условия прозрачности на AC:

$$\begin{aligned} P_x &= -\sigma_{xx} = -c_p \rho \dot{u}_x - \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} + c_p \rho \dot{u}_x^1; \\ P_z &= -\sigma_{xz} = -c_s \rho \dot{u}_z + c_s \rho \dot{u}_z^1; \end{aligned} \quad (5)$$

условия прозрачности на BD:

$$\begin{aligned} P_x &= \sigma_{xx} = -c_p \rho \dot{u}_x + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} + c_p \rho \dot{u}_x^1; \\ P_z &= \sigma_{xz} = -c_s \rho \dot{u}_z + c_s \rho \dot{u}_z^1. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь c_p, c_s – скорости распространения продольной и поперечной волн; \dot{u}_x^1 и \dot{u}_z^1 – значения скоростей, являющихся решением соответствующих одномерных задач для плоской волны в вспомогательной прямоугольной области с необходимыми граничными условиями, которые приведены ниже.

Начальные условия при $t=0$ задаются равными нулю перемещений и скоростей частиц в заданной области

$$u_x = 0; \dot{u}_x = 0; u_z = 0; \dot{u}_z = 0. \quad (7)$$

Для вычисления \dot{u}_x^1, \dot{u}_z^1 вводятся дополнительные вспомогательные области (рис. 1) с целью вычисления процесса распространения исходной волны при одинаковых физических характеристиках, как в Ω , и со следующими геометрией и границами:

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \{(x, z): x \in [0, \Delta L], z \in [0, -H]\}, \\ \Gamma_{l1} &= \{(x, z): x = 0, z \in [0, -H]\}, \\ \Gamma_{r1} &= \{(x, z): x = \Delta L, z \in [0, -H]\}, \\ \Gamma_{b1} &= \{(x, z): x \in [0, \Delta H], z = -H\}, \\ \Gamma_{t1} &= \{(x, z): x \in [0, \Delta H], z = 0\}. \end{aligned}$$

Для вспомогательной задачи ширину области расчета L достаточно взять в размере одного конечного элемента, размер которого соответствует размеру конечного элемента на границе основной области, а высота области H равна высоте основной области. Разбиение на конечные элементы должно соответствовать разбиению на конечные элементы на соответствующей границе основной области расчета. В этом случае граничными условиями в случае действия продольной волны на границе Γ_{b1} имеют вид:

$$\begin{aligned} P_z &= -\sigma_{zz} = -c_p \rho \dot{u}_z - \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} + 2c_p \rho f_p(t); \\ P_x &= -\sigma_{xz} = -c_s \rho \dot{u}_x; \end{aligned} \quad (8)$$

условия не отражения на Γ_{l1} :

$$\begin{aligned} P_z &= \sigma_{zz} = -c_p \rho \dot{u}_z + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x}; \\ P_x &= \sigma_{xz} = -c_s \rho \dot{u}_x; \end{aligned} \quad (9)$$

или условия свободной поверхности:

$$P_z = \sigma_{zz} = 0; P_x = \sigma_{xz} = 0; \quad (10)$$

на границах Γ_{l1} и Γ_{r1} задаются условия идеального скольжения:

$$u_x = 0; P_x = \sigma_{xz} = 0. \quad (11)$$

Если на нижней границе поступает сдвиговая волна, тогда на границе Γ_{b1} условия имеют вид:

$$\begin{aligned} P_x &= -\sigma_{xz} = -c_s \rho \dot{u}_x + 2c_s \rho f_s(t); \\ P_z &= -\sigma_{zz} = -c_p \rho \dot{u}_z - \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x}; \end{aligned} \quad (12)$$

условия не отражения на Γ_{t1} :

$$\begin{aligned} P_z &= \sigma_{zz} = -c_p \rho \dot{u}_z + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x}; \\ P_x &= \sigma_{xz} = -c_s \rho \dot{u}_x; \end{aligned} \quad (13)$$

или условия свободной поверхности:

$$P_z = \sigma_{zz} = 0; P_x = \sigma_{xz} = 0; \quad (14)$$

на границах Γ_{l1} и Γ_{r1} задаются условия:

$$u_z = 0; P_x = \sigma_{xz} = 0. \quad (15)$$

Начальные условия для одномерных вспомогательных задач аналогичны условиям основной задачи.

Представленные постановка задачи и граничные условия можно использовать при изменении свойств среды только вдоль оси Oz , в частности среда может быть слоистой, поверхности каждого слоя должны быть параллельными к свободной поверхности

3. Результаты исследования

Для обоснования предложенной математической модели выполнен расчет перемещений, скоростей и напряжений в заданной прямоугольной области с размерами 100 м x 50 м и соответственно одномерной области высотой 50 м, которые представляют однородный грунт со следующими механическими характеристиками: модуль Юнга $E=150$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0.3$ и плотность



$\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$. Обделка представляет железобетонное кольца внешним диаметром 6 м и толщиной 0.3 м, модулем Юнга $E=20000 \text{ МПа}$, коэффициентом Пуассона $\nu=0.3$ и плотностью $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$. В расчетах центры колец расположены на глубине: $z=-10 \text{ м}$, центры отдалены на расстоянии L_{int} . Рассмотрены случаи: $L_{\text{int}}=8 \text{ м}$, $L_{\text{int}}=10 \text{ м}$, $L_{\text{int}}=12 \text{ м}$, $L_{\text{int}}=16 \text{ м}$, $L_{\text{int}}=24 \text{ м}$. Шаг по времени $\Delta t=0.001 \text{ с}$, время расчета $T=2 \text{ с}$.

В качестве примера продольная падающая волна задается в виде $f_p = A(t) \cos(2\pi\omega t)$, где $A(t) = A_0 \cdot t/t_0$ при $t < t_0$, $A(t) = A_0$ в противном случае, t_0 – заданный интервал нарастания волны, A_0 – заданная амплитуда и ω – частота гармонической волны. В расчетах приняты следующие значения параметров падающей волны: $A_0=1 \text{ м/с}$, $t_0=0.5 \text{ с}$, $\omega=2 \text{ Гц}$. При этом поперечная падающая волна $f_s = 0$.

Реализация задачи проводилась в свободно распространяемой системе программирования для МКЭ FreeFem++ [22]. В качестве конечных элементов использовался треугольный элемент с шестью узлами, второй степени точности.

Структура конечно-элементной сетки приведена на Рисунке 2.

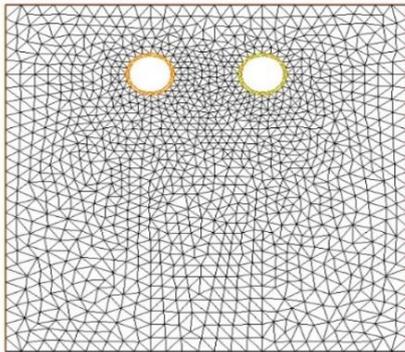


Рис. 2. Конечно-элементная сетка области

В графиках, приведенных на Рисунке 3, показано изменение интенсивности напряжений в зависимости от расстояния между двумя обделками, в случаях продольной и сдвиговой волн. Точка наблюдения взята на левой стороне правой обделки в точке внутри обделки: $z=-10 \text{ м}$ и на расстоянии 0.2 м от внешнего радиуса обделки.

Из графиков видно что для продольной волны при различных расстояниях между обделками наибольшее значение интенсивности напряжений достигается при $L_{\text{int}}=8 \text{ м}$, среднее значение при $L_{\text{int}}=16 \text{ м}$, затем оно уменьшается до 0.02 МПа при $L_{\text{int}}=24 \text{ м}$. Заметим что максимальное значение при $L_{\text{int}}=12 \text{ м}$ больше чем максимальное значение при $L_{\text{int}}=10 \text{ м}$, это связано с тем, что вблизи обделок происходит сложный дифракционный процесс, который зависит так же от длины волны и близости свободной поверхности.

При заданной сдвиговой волне наибольшие максимальные значения интенсивности напряжений достигаются при $L_{\text{int}}=16 \text{ м}$, а наименьшие при $L_{\text{int}}=10 \text{ м}$, среднее максимальное значение при $L_{\text{int}}=12 \text{ м}$, это свидетельствует о том, что с уменьшением расстояния между обделками при сдвиговой волне значение интенсивности напряжений уменьшаются.

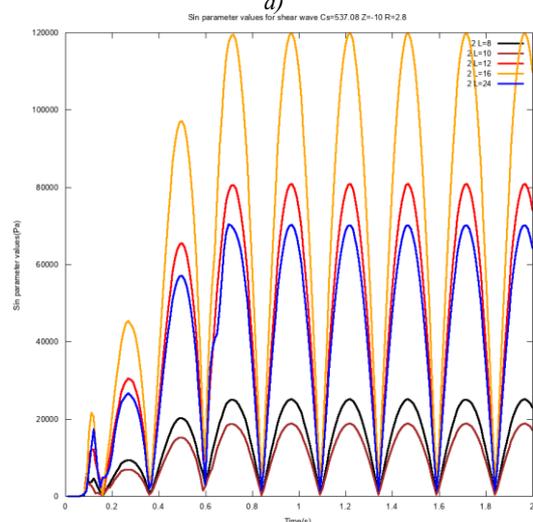
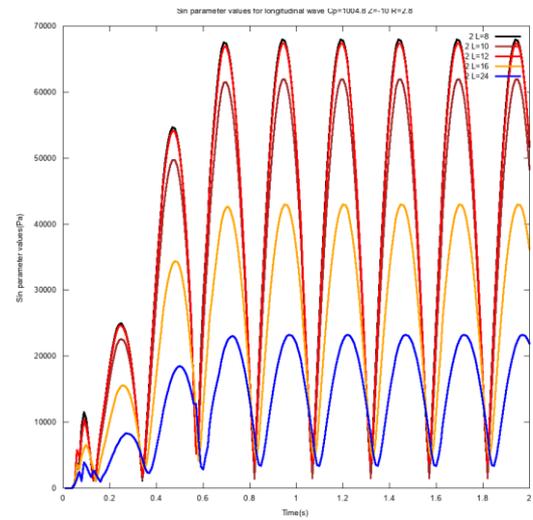
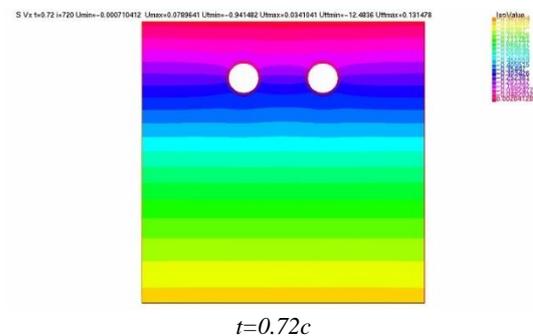


Рис. 3. Графики интенсивности напряжений в обделке в зависимости от расстояния между обделками: а) для продольной волны, б) для сдвиговой волны

С целью показа распространения волн в искусственно ограниченной области с одной и двумя обделками, находящихся в неограниченной области, в приложении на Рисунке 4 приведена динамика прохождения сдвиговой волны в разные моменты времени.



$t=0.72c$



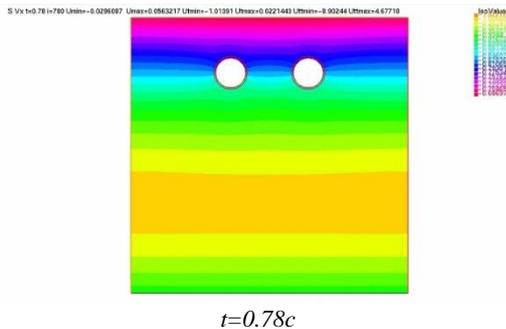


Рис. 4. Процесс прохождения сдвиговой волны в грунтовой среде с условием прозрачности на искусственных границах

4. Выводы и рекомендации

Получены точные условия на прозрачных границах, когда заданные продольная и поперечная волны поступают в искусственно ограниченную прямоугольную область параллельно к свободной поверхности этой области. С использованием свободно распространяемой системы программирования для МКЭ FreeFem++ и метода Бате решена задача о воздействии упругих волн на круговые обделки в однородной грунтовой среде. В качестве примера решена задача о воздействии продольной и поперечной гармонической волн, поступающей через нижнюю искусственную прозрачную границу области. Приведены результаты расчетов и проведен анализ динамической реакции обделки при различном расстоянии между обделками. С увеличением расстояния между обделками при воздействии продольной волны в зависимости от ее длины интенсивность динамических напряжений в обделках уменьшается до определенного значения, т.е. стремится к значению для случая одиночной обделки. При воздействии сдвиговой волны с увеличением расстояния между обделками сначала интенсивность напряжений увеличивается, а затем начинает падать до значения как при одиночной обделке.

Использованная литература / References

- [1] Lysmer J., Kihlemeyer L. Finite Dynamik Model for Infinite Media *Journal Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol.95, No.4, 1969, pp. 859-887, <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.000114>
- [2] Mirsaidov M.M., Sultanov T.Z., Rumi D.F. An assessment of dynamic behavior of the system "structure – foundation" with account of wave removal of energy, *Magazine of Civil Engineering*, No.4, 2013, pp. 94-127, <https://doi.org/10.5862/MCE.39.10>
- [3] Il'ichev V.A., Yuldashev, S.S. and Saidov S.M. Propagation of vibration from trains in relation to track position. *Soil Mech Found Eng* No.36, 1999, pp. 55–56, <https://doi.org/10.1007/BF02469085>
- [4] Yuldashev S.S., & Karabaeva, M.U. Soil surface vibrations in the training of metro trains in parallel tunnels. *Theoretical & Applied Science*,

Vol.85 No. 5. 2020, pp. 117-121, <https://doi.org/10.15863/TAS.2020.05.85.24>

[5] Li S., Bruna M., Djeran-Maigrea I., Kuznetsov S. Benchmark for three-dimensional explicit asynchronous absorbing layers for ground wave propagation and wave barriers, *Computers and Geotechnics*, No. 131. 2021, pp. 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103808>

[6] Bruno Guidio, Boris Jeremić, Leandro Guidio, Chanseok Jeong. Passive seismic inversion of SH wave input motions in a truncated domain, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No.158, 107263, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107263>

[7] Xavier Antoine, Anton Arnold, Christophe Besse, Matthias Ehrhardt and Achim Schadle. A Review of Transparent and Artificial Boundary Conditions Techniques for Linear and Nonlinear Schrodinger Equations, *Communications in Computational Physics.*, Vol.4, No.4, 2008, pp.729-796, <http://www.global-sci.com>

[8] Yacine Bakhtaoui. New procedure for soil-structure interaction problems incorporating free-field effects by 2D quadratic elements, *Computers and Geotechnics*. No.165, 105843, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105843>

[9] Pilar Velasco M., David Usero, Salvador Jim'enez, Luis V'azquez, Transparent boundary conditions for the wave equation in one dimension and for a dirac-like equation, *Electronic Journal of Differential Equations, Conference*. No.22, 2015, pp. 117-137, <https://ejde.math.txstate.edu/conf-proc/22/v2/velasco.pdf>

[10] Miralimov M., Normuradov Sh., Ground behaviour and settlements analysis on tunnelling of shallow-buried metro in Tashkent city *E3S Web of Conferences*. Vol. 401, No. 01062, 2023, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340101062>

[11] Adilov F, Yuldoshev B, Abirov R, Miralimov M. , Numerical approach for estimation of stress strain state of deep tunnels *E3S Web of Conferences*, vol. 97. 2019, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704064>

[12] R. Abirov, M. Miralimov. Calculation of the Lining of Construction of the Shallow Subway Tunnel. *Hydraulic and Civil Engineering Technology VIII M. Yang et al. (Eds.)* 2023, <https://doi.org/10.3233/ATDE230700>

[13] Oztur K.F. Investigation of dynamic responses of three-sided underpass culvert under near-fault and far-fault ground motions considering soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 177 No. 108446. 2024, <https://hdl.handle.net/20.500.12440/6143>

[14] Bapir B., Abrahamczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento F., Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures, *Front. Built Environ., Sec. Earthquake Engineering*. vol. 9. 2023, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1120351>



[15] Silvia Falletta and Giovanni Monegato, Exact nonreflecting boundary conditions for exterior wave equation problems. *Publications de l'institut mathématique nouvelle série*, No. 96, 2014, pp.103–123, <https://doi.org/10.2298/PIM1410103F>

[16] Mirzaev I., Gaynazarov S., Rakhimjanova N. Numerical solution of the wave problem in an elastic medium with transparent boundaries *AIP Conference Proceedings*, 1 3119(1), 040004 2024, <https://doi.org/10.1063/5.0214823>

[17] Kuznetsov S.V., Terentyeva E.O. Lamb's plane internal problem: waves in the epicentral zone from a vertical power source. *Acoustic Journal*. Vol. 61. No. 3. pp. 387-399, 2015, <https://doi.org/10.7868/S0320791915030119>

[18] Grishin A., Geraschenko V. Calculation of Rayleigh Damping Coefficients for a Transient Structural Analysis, *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. Vol. 19, pp. 49-54, 2024, <https://doi.org/10.37394/232011.2024.19.>

[19] Pedro Folhento, Rui Carneiro De Barros, Manuel Braz-César. "Effect of Earthquake-Induced Structural Pounding on the Floor Accelerations and Floor Response Spectra of Adjacent Building Structures", *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. Vol. 19, pp. 36-48, 2024, <https://doi.org/10.37394/232011.2024.19.4>

[20] Zienkiewicz O.C. and Morgan K. *Finite elements and approximation*, "Wiley-Interscience" New York, 1983.

[21] Bathe K.J. *Finite Element Procedure Second Edition*, Printed in the United States of America, 2016.

[22] Hecht F., Pironneau O., Le Hyaric A., Ohtsuka K. *FreeFem++*. Third Edition, Version 3 / Laboratoire Jacques-Louis Lions, Université Pierre et Marie Curie, Paris, <https://freefem.org/>

Информация об авторах/ Information about the authors

**Mirzayev
Ibraxim /
Mirzaev
Ibrakhim**

f.-m.f.d., professor, Toshkent davlat transport universiteti
e-mail: ibrakhim.mir@mail.ru
[+998909388017](tel:+998909388017)
<https://orcid.org/0000-0002-8616-9717>

**Gaynazarov
Sulton
Mamanazarovich
/ Gaynazarov
Sultan
Mamanazarovich**

f.-m.f.n., dotsent, Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston milliy universiteti
e-mail:
sultangainazarov@gmail.com
[+998935841241](tel:+998935841241)
<https://orcid.org/0009-0001-2535-1283>



K. Sultanov

Parameters of underground metro structure interaction with soil under seismic loads and methods for their determination8

B. Mardonov, N. Nishonov, M. Berdibaev, A. Khurramov, R. Azamov

Vibrations of a rigid beam elastically connected to deformable supports under seismic loads13

A. Belyi, Sh. Kadirova, M. Mamadaliev

Experience in Implementation and Prospects for the Development of Structural Health Monitoring Systems at Transport and Civil Infrastructure Facilities20

U. Shermukhamedov, Sh. Mirkhodjaev, A. Karimova, A. Abdullaev

On the issue of assessing a monolithic reinforced concrete overpass under seismic impacts24

I. Mirzaev, S.M. Gaynazarov

Mutual influence of parallel tunnels in an elastic medium in the epicentral zone of an earthquake31

Sh. Erboev, D. Juraeva

Modern building materials based on household waste and natural raw materials37

Kh. Akramov, R. Ametov

Physicochemical analysis of expanded clay concrete modified with mineral and chemical additives39

Z. Rakhimjonov, A. Khurramov

Application of new seismically insulated supporting parts for seismic protection of bridge intermediate buildings44

E. Shipacheva, Z. Muradov

Concrete for Additive Construction Production in Dry Hot Climate Conditions for Transport Infrastructure49

I. Mirzaev, U. Shermukhamedov, A. Karimova, A. Abdullaev

Seismic Performance of Continuous Monolithic Bridges54

A. Khasanov, Z. Khasanov, B. Kurbanov, B. Toshmukumov

Use of basalt reinforcement, mesh, and fabrics as structural materials in geotechnical and earthworks59