

К вопросу определения транспортной нагрузки на полимерные водопропускные трубы на лесных дорогах

А.М. Меньшиков^а, М.Ю. Платонов^б, А.Е. Земцовский^с

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия,

^а alm2005@mail.ru, ^б hackslimm@yandex.ru, ^с a.zemtsovsky@narfu.ru

^а <https://orcid.org/0000-0003-1220-2817>, ^б <https://orcid.org/0009-0008-7681-2802>,

^с <https://orcid.org/0000-0001-7485-6651>

Статья поступила 23.06.2025, принята 23.09.2025

На автомобильных дорогах лесопромышленного комплекса Архангельской области основными водопропускными сооружениями являются жёсткие круглые железобетонные трубы, отработавшие по несколько десятилетий и требующие ремонта или реконструкции. Альтернативой им являются более технологичные и долговечные гибкие водопропускные трубы из полимерных композитов. Однако тяжёлые, специфичные режимы эксплуатации лесных дорог, особенно лесовозных дорог, препятствуют их широкому распространению на ведомственных лесных автодорогах. В данной работе обоснована правомерность применения индивидуальных, увеличенных в сравнении с рекомендуемыми ГОСТ 71404-2024 и нормативными документами Росавтодора значений вертикальных сил при расчётах гибких полимерных водопропускных труб, уложенных в конструкциях лесных автомобильных дорог, на прочность и устойчивость формы с учётом специфики условий их эксплуатации. Теоретически исследованы способы передачи на шельгу трубы транспортной нагрузки от колёс многоосного расчётного автопоезда-сортиментовоза. При этом предложено определять расчётную вертикальную нагрузку на гибкую трубу как сосредоточенную силу, приложенную нормально в расчётном сечении над осью трубы. Данная нагрузка является эквивалентной динамическому воздействию на это сечение системы всех колёсных нагрузок многоосного современного автопоезда-сортиментовоза. Рассмотрены два способа передачи вертикального давления от транспортной нагрузки на поверхность трубы: 1) непосредственно через колесо расчётного автомобиля (гибкий штамп), с распределением напряжений в слоистом массиве над трубой по теории Ж.Буссинеска; 2) опосредованно, через дорожную железобетонную плиту (жёсткий штамп), распределяющую напряжения в массиве над трубой по теории А. Фламана. Для обоих способов выполнены и верифицированы расчёты вертикального давления от транспортной нагрузки на уровне шельги трубы, обоснована целесообразность укладки жёстких железобетонных дорожных плит на ездовой поверхности дороги над трубой в качестве её защиты.

Ключевые слова: лесные дороги, полимерные водопропускные трубы, автопоезда-сортиментовозы, расчётные транспортные нагрузки, силовое воздействие на гибкие трубы.

On the issue of transport load on polymer culverts on forest roads

A.M. Menshikov^a, M.Yu. Platonov^b, A.E. Zemtsovsky^c

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia

^a alm2005@mail.ru, ^b hackslimm@yandex.ru, ^c a.zemtsovsky@narfu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-1220-2817>, ^b <https://orcid.org/0009-0008-7681-2802>,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7485-6651>

Received 23.06.2025, accepted 23.09.2025

On the roads of the timber industry complex of the Arkhangelsk region, the main water-conducting structures are rigid round reinforced concrete pipes that have been in use for several decades and require repair or reconstruction. Technologically advanced, flexible and longeval culverts made from polymer compound could be considered as an alternative. However, the heavy, specific operating conditions of forest roads, especially logging roads, prevent their widespread use on departmental forest roads. The paper substantiates the validity of using individual, increased in comparison with the recommended GOST 71404-2024 and regulatory documents of the Federal Road Transport Agency, values of vertical forces in calculating the strength and stability of flexible polymer culverts laid in the structures of forest roads, taking into account the specific conditions of their operation. The methods of transferring the transport load from the wheels of a multi-axle design timber truck to the pipe shell are theoretically investigated. In this case, it is proposed to determine the design vertical load on the flexible pipe as a concentrated force applied normally in the design section above the pipe axis. This load is equivalent to the dynamic impact on this section of the system of all wheel loads of a modern multi-axle timber truck. The two options for vertical load transmission over a culvert surface are described as follows: 1) directly through the wheel of the calculation vehicle (flexible stamp), with stress distribution in the layered massif above the pipe according to the theory of J. Boussinesq; 2) indirectly, through a reinforced concrete road slab (rigid stamp), distributing stress in the massif above the pipe according to the theory of A. Flamand. For both methods, calculations of vertical pressure from transport load at the level of the pipe shell are performed and verified, the expediency of laying rigid reinforced concrete road slabs on the driving surface of the road above the pipe as its protection is substantiated.

Keywords: forest roads, polymer culverts, freight trains, calculated transport loads, force impact on flexible pipes.

Введение. На автомобильных дорогах лесопромышленного комплекса основными водопропускными сооружениями являются круглые железобетонные трубы, деревянные мосты и деревянные лотки. Согласно исследованиям [1], на лесовозных дорогах Архангельской области наиболее распространены (78 %) круглые железобетонные трубы диаметром 1,0 м, среднее количество которых составляет 1,19 труб на 1 км. Железобетонные трубы проектировались и строились в давние времена под нагрузки А-8 и НГ-60.

Отслужившие несколько десятилетий жёсткие железобетонные трубы в абсолютном большинстве требуют капитального ремонта, предпочтительнее – реконструкции, поскольку в настоящее время появилась альтернатива в виде гибких полимерных труб, которые обладают рядом существенных преимуществ [2].

Укладка гибких водопропускных труб из полимерных композиционных материалов широко практикуется на автодорогах за рубежом и на дорогах общего пользования высоких технических категорий в России [12]. Однако на автодорогах лесопромышленного комплекса полимерные водопропускные трубы распространения пока не получили, применяются единично, только в опытно-пilotном порядке.

Нормативная база по использованию полимерных водопропускных труб в конструкциях автодорог общего пользования развивается, в настоящее время она представлена множеством документов, например, [5–9, 11, 16, 18] и др. При этом значения транспортных нагрузок (колесных, гусеничных), принимаемых в расчетах гибких труб на прочность и устойчивость формы, весьма эклектичны: АК-80, НГ-80, А11, Н11, А14, Н14 и даже А1 – 100 кН на ось [5]. При этом акцент делается на насыпи высотой 2...12 м и более, где доминирующими становятся напряжения от статической нагрузки столба грунта и дорожной одежды.

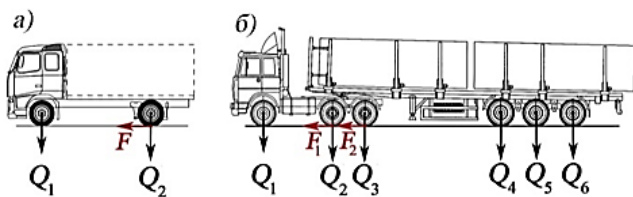


Рис. 1: а – расчетный автомобиль группы А-10, А-11,5 по ГОСТ 71404-2024 [15]; б – автопоезд-сортиментовоз Mercedes-Benz Actros 3346S + SH-368

Специфика лесовозных дорог заключается в том, что в составе движения преобладают многоосные автопоезда полной массой $G = 50...60$ т с осевыми нагрузками $Q = 130...160$ кН в статике. При проектировании продольного профиля лесовозных дорог традиционно используется метод «обёртывающей линии» в низких насыпях. Поэтому глубина заложения водопропускных труб зачастую не превышает 1 м.

Учитывая, что нормальные напряжения от транспортной нагрузки охватывают рабочую зону земляного полотна на глубине до 1,5...2 м, их воздействие на трубы, уложенные в конструкциях лесовозных дорог, является более агрессивным в сравнении с трубами на дорогах общего пользования.

Кроме того, в силовом взаимодействии ведущих колёс лесовозных автопоездов с ездовой поверхностью проявляют себя значительные касательные силы F (рис. 1), величина которых может достигать $0,4...0,5Q$, а в случае многокомплектных автопоездов – $0,8...0,9Q$. Большие горизонтальные силы вызывают сдвиги в конструкциях лесовозных дорог, что также несвойственно дорогам общего пользования.

В указанных выше нормативных документах представлены методы расчётов гибких труб, учитывающие совместное действие на трубу статической нагрузки от расположенного над ней столба грунта насыпи, и динамической нагрузки от движущегося по дороге транспортного средства. При проектировании дорожных конструкций в качестве расчетного автотранспортного средства (далее – АТС) следует принимать наиболее тяжелый автомобиль из систематически обращающихся на дороге, доля которых в составе движения составляет не менее 10 % [10]. В составе движения по лесовозным дорогам доля многоосных автопоездов составляет 80...90 %, поэтому их всегда принимают в качестве расчетных АТС. Вследствие этого, принимаемые в расчётах лесовозных дорог нагрузки от АТС отличаются от стандартных расчётных нагрузок, используемых при проектировании дорожных одежд [10] и водопропускных труб [11].

Цель и метод исследования. Проектные расчёты гибких полимерных водопропускных труб с учётом их совместной работы с грунтом насыпи автомобильной дороги ведут по двум предельным состояниям: по первому предельному состоянию – на прочность и устойчивость стенок трубы, по второму – на деформации и динамические воздействия. Динамические расчеты труб рекомендуется проводить при толщине засыпки не более 5 м и при наихудшем положении транспортной нагрузки на верху насыпи [14].

Одним из ключевых вопросов при расчетах гибких труб по предельным состояниям является определение величины и характера передачи транспортной нагрузки на поверхность трубы.

В нормативных документах распределение напряжений в массиве над трубой от действия на ездовой поверхности сосредоточенной динамической транспортной нагрузки обычно принимается по теории Ж. Буссинеска. Максимальное вертикальное давление имеет место непосредственно в точке приложения нагрузки. В большинстве нормативных документов рекомендуется определять вертикальное давление над шельгой трубы по упрощенной формуле [13]:

$$q_{mp} = \frac{0,478T}{H^2}, \quad (1)$$

где T – вес, приходящийся на одиночную ось расчетного АТС, Н; H – глубина засыпки трубы, м.

При этом расчёт ведётся на осевую нагрузку, а эпюра распределения вертикального давления принимается в виде симметричной трапеции с боковыми сторонами под углом $41...45^\circ$.

Для изотропного грунтового массива без дорожной одежды такая схема распределения давления в принци-

пе приемлема. Но для слоистой системы в виде дорожной одежды с различными параметрами слоев, уложенной на земляном полотне, она является, на наш взгляд, весьма утрированной. В этой связи, в качестве альтернативы в работе [3] нами был предложен другой подход к определению вертикального давления от колеса расчётного АТС в слоях засыпки трубы, который получил развитие в данном исследовании.

Цель работы – определить корректные способы расчета и передачи транспортной нагрузки на водопропускные трубы из полимерных материалов, которые обеспечивают адекватные результаты проектных расчетов труб на прочность и устойчивость формы при эксплуатации в конструкциях лесовозных дорог.

Методология и метод исследования – теория упругости слоистых систем, механика грунтов, методы расчетов гибких безнапорных труб в траншеях.

Методика расчетов. На лесовозных дорогах, где преобладают дорожные одежды переходного и низшего типов, передача давления от транспортной нагрузки на поверхность гибкой трубы осуществляется двумя способами:

1) через колесо расчетного автомобиля (гибкий штамп), с распределением напряжений в слоистом грунтовом массиве по теории Ж. Буссинеска;

2) опосредованно, через дорожную железобетонную плиту (жесткий штамп), распределяющую напряжения в массиве грунта по теории А. Фламана.

Способ 1. Концепция динамического расчета прочности дорожной конструкции под воздействием системы вертикальных сил, передаваемых на её ездовую поверхность через колеса многоосного АТС, сводится к определению такой силы, которая, будучи статически приложена в расчётном сечении дороги, по своему воздействию на ездовую поверхность была бы эквивалентной динамическому воздействию на это сечение всей системы сил от движущегося многоосного и многоколесного АТС. В качестве расчётного рассматривается сечение дорожной конструкции по оси водопропускной трубы (рис. 2).

Расчёт эквивалентной нагрузки ведётся на основе теории упругости на действие на дорожную конструкцию нагрузки от i -го колеса с учётом влияния на её напряжённно-деформированное состояние рассматриваемого i -го колеса с нагрузкой Q_i и дополнительного воздействия других близко расположенных колес расчетного АТС. В соответствии с принципом независимости действия сил, определяется нагрузка от каждого колеса отдельно. Результирующее воздействие группы колес определяется суперпозицией отдельных колесных нагрузок, с учетом знаков и ординат линий влияния, и характеризуется эквивалентной динамической колесной нагрузкой $Q_i^{эkv}$.

Алгоритм расчёта эквивалентных колесных нагрузок, апробированный применительно к подвижному составу лесовозных дорог, приводится в работе [2].

Методика определения главных напряжений в слоях дорожной конструкции от действия на поверхности сосредоточенных вертикальных и горизонтальных сил детально, с примером расчёта изложена в нашей работе [4]. Согласно этой методике, оператор для определения

нормальных напряжений в слоях дорожной конструкции имеет общий вид

$$\sigma_{zi} = -p\beta \int_0^\infty F_1(\alpha, \eta, \mu, E) I_0(\alpha\beta) I_1(\alpha\beta) d\alpha, \quad (2)$$

где σ_{zi} – нормальные напряжения в i -ом слое; F_1, F_2, F_3 – функции, зависящие от упругих констант E (модуля упругости), μ (коэффициента Пуассона), места расположения слоя в конструкции и параметра интегрирования α ; $I_0(\alpha\beta), I_1(\alpha\beta)$ – функции Бесселя первого рода соответственно нулевого и первого порядков.

Параметры β, η, ρ вычисляются по формулам

$$\beta = \frac{D}{2H}, \quad \eta = \frac{z}{H}, \quad \rho = \frac{r}{H}, \quad (3)$$

где D – диаметр круга площадью, эквивалентной площади отпечатка колеса; r, z – текущие координаты; $H = a_1$ – толщина засыпки над трубой, включая слои дорожной одежды.

Для обоснования проектных решений распределение вертикальных напряжений по глубине массива наиболее удобно представить в виде графика $\sigma_{zi} = f(z)$.

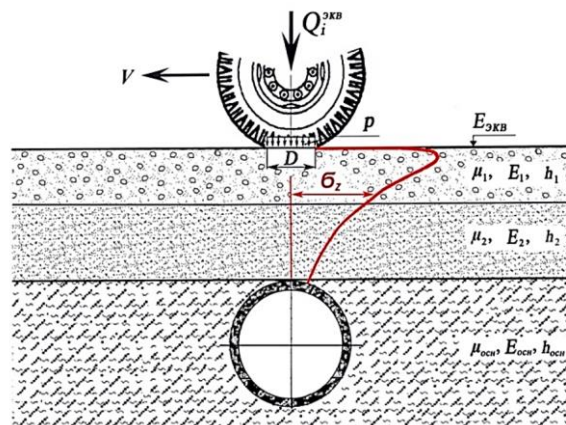


Рис. 2. Расчётная схема передачи транспортной нагрузки на водопропускную трубу по теории Ж. Буссинеска с учётом действия на покрытие дороги касательных сил

Способ 2. Уменьшение нормальных напряжений в грунтовом массиве над гибкой трубой от транспортной нагрузки возможно защитой труб сверху дорожной железобетонной плитой или бетонной подушкой. Такой способ рекомендуется для применения в нормативных документах, например, в [5], и встречается в практике эксплуатации лесовозных дорог (рис. 3), однако расчетного обоснования он пока не получил.

В схеме на рис. 3, принятой аналогично схеме в работе [17], плита рассматривается как обособленная, без стыковых соединений пластина конечной длины, лежащая на поверхности упругого полупространства. Высота пластины мала в сравнении с линейными размерами основания, что позволяет применить хрестоматийное для плоской задачи теории упругости дифференциальное уравнение её изогнутой оси совместно с уравнением осадки поверхности грунта [19].

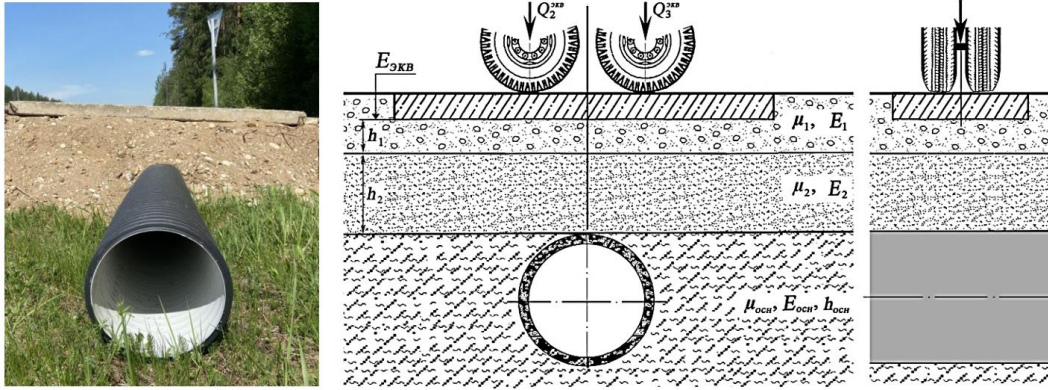


Рис. 3. Общий вид и схема передачи транспортной нагрузки на гибкую трубу через дорожные железобетонные плиты

Обычным при решении подобных задач является допущение четырех условий контактности плиты с основанием (равенство прогибов плиты и грунта на обоих концах; равенство площадей, образованных ординатами обеих изогнутых линий; равенство третьих производных обеих функций прогибов в середине плиты), а также двух условий равновесия плиты [19].

Упругая линия прогнувшейся плиты описывается дифференциальным уравнением 4 порядка

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{12(1-\mu^2)}{Eh^3} (p(x, y) - q(x, y)), \quad (4)$$

где $w = w(x, y)$ – деформация плиты; x, y – координаты точки приложения нагрузки; μ – коэффициент Пуассона для материала плиты; E – модуль упругости плиты; h – толщина плиты; $p(x, y)$ – интенсивность внешней нагрузки с учётом собственного веса плиты; $q(x, y)$ – интенсивность реакции основания.

Деформированная нагрузкой от тележки мостов автопоезда поверхность расположенного под плитой массива описывается интегральным уравнением

$$v(x, y) = \frac{1-\mu_0^2}{\pi E_0} \iint_S \frac{q(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}}, \quad (5)$$

где μ_0 – коэффициент Пуассона материала основания; E_0 – эквивалентный модуль упругости основания; ξ, η – текущие координаты.

И.А. Симвулиди предложил определять реактивное давление основания на плиту по формуле [15]:

$$p_\xi = a_0 + 2a_1(\xi - 0,5) + 4a_2(\xi - 0,5)^2 + 8a_3(\xi - 0,5)^3, \quad (6)$$

параметры которой вычисляются в следующем порядке:

$$\alpha = \frac{1-\mu^2}{1-\mu_0^2} 12\pi \frac{E_0}{E} \left(\frac{L}{h}\right)^3, \quad \xi = \frac{x}{L}, \quad x \in [0, L]; \quad \beta_{3i} = \frac{l_{3i}}{L}; \quad (7)$$

$$a_0 = \frac{(8252 - 34\alpha)(1/L) \sum Q_i^{жкв} - 13440B\alpha}{13440 + 29\alpha}; \quad (8)$$

$$\frac{a_2}{3} = \frac{(5188 + 63\alpha)(1/L) \sum Q_i^{жкв} + 13440B\alpha}{13440 + 29\alpha}; \quad (9)$$

$$\frac{a_1}{3} = \frac{(1280 - \alpha)(1/L^2) [2 \sum Q_i^{жкв} \beta_{3i} - \sum Q_i^{жкв}] - 8N\alpha}{2048 + \alpha}; \quad (10)$$

$$\frac{a_3}{10} = \frac{(384 + \alpha)(1/L^2) [2 \sum Q_i^{жкв} \beta_{3i} - \sum Q_i^{жкв}] + 4N\alpha}{2048 + \alpha}; \quad (11)$$

$$W = [1/(6L)] \cdot [\Gamma_0^{\beta_{31}=0,5} Q_2^{жкв} (0,5 - \beta_{31})^3 + \Gamma_0^{\beta_{32}=0,5} Q_3^{жкв} (0,5 - \beta_{32})^3]; \quad (12)$$

$$B = [1/(48L)] [2 \sum Q_i^{жкв} (1 - \beta_{3i})^4 - \sum Q_i^{жкв} (1 - \beta_{3i})] - W; \quad (13)$$

$$N = (1/L) [\Gamma_0^{\beta_{31}=0,5} Q_2^{жкв} + \Gamma_0^{\beta_{32}=0,5} Q_3^{жкв} - \sum Q_i^{жкв} (1 - \beta_{3i})]. \quad (14)$$

$\Gamma_0^{\beta_{3i}=0,5}$ – двухсторонний мгновенный функциональный прерыватель Герсевича первого порядка.

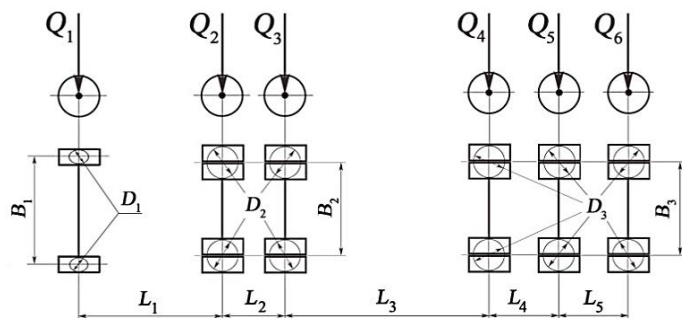


Рис. 4: а – общий вид расчетного АТС; б – схема для определения эквивалентных колесных нагрузок АТС

Корректность принятых исходных предпосылок в [15] проверяется соблюдением обязательных условий:

$$\begin{cases} p_{x=0} = (a_0 + a_2) - (a_1 + a_3) \geq 0, \\ p_{x=L} = (a_0 + a_2) + (a_1 + a_3) \geq 0, \\ p_{x=L/2} = a_0 \geq 0. \end{cases} \quad (15)$$

В случае невыполнения условий (15) следует рассмотреть плиту с другими параметрами жесткости.

Результаты исследования. Расчёт эквивалентной динамической осевой нагрузки $Q_i^{экс}$ выполнен нами для наиболее распространенного в лесозаготовительных предприятиях холдинга ГК «Титан» автопоезда-сортиментовоза в составе тягача Mercedes-Benz Actros 3346 S и полуприцепа SH-368 (рис. 4).

Расчетные параметры АТС представлены в табл. 1.

Таблица 1. Размерно-весовые параметры расчетного АТС

Статические осевые нагрузки, кН						Давление воздуха в шинах, МПа		
Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	P_1	P_2	P_3
75	130	130	120	120	120	0,83	0,83	0,85
Межосевые расстояния, м						Колея, м		
L_1	L_2	L_3	L_4	L_5		B_1	B_2	B_3
3,300	1,350	5,875	1,360	1,360		2,034	1,804	1,820

Результаты расчётов эквивалентных динамических осевых нагрузок автопоезда-сортиментовоза Mercedes-Benz Actros 3346 S + SH-368 представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчётов эквивалентных динамических осевых (удвоенных колёсных) нагрузок

$2Q_1^{экс}$	$2Q_2^{экс}$	$2Q_3^{экс}$	$2Q_4^{экс}$	$2Q_5^{экс}$	$2Q_6^{экс}$
99,74	196,36	240,04	177,76	224,98	223,50

Результаты расчётов эквивалентных нагрузок показывают, что пять из шести осевых нагрузок автопоезда-сортиментовоза Mercedes-Benz Actros 3346S + SH-368 превышают нормативную временную вертикальную нагрузку от подвижного состава на автомобильных дорогах А14 (с учётом равномерно распределённой нагрузки интенсивностью 14 кН/м), установленную в СП 35.13330.2011 [11], на 41...71 %.

Вместе с тем, учитывая, что лесовозные дороги строятся за счёт себестоимости лесопроизводства, проектирование гибких труб на тяжёлые нагрузки в виде четырёхосной тележки Н14 с нагрузкой на ось 18К представляется экономически нецелесообразным.

Расчёты контактных напряжений в дорожной конструкции производились на эквивалентную нагрузку $Q_3^{экс} = 120,02$ кН при следующих исходных данных:

1 слой: гравийно-песчаная смесь, модуль упругости $E_1 = 180$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu_1 = 0,25$, толщина слоя $h_1 = 30$ см;

2 слой: песок мелкозернистый, модуль упругости $E_2 = 100$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu_2 = 0,30$, толщина слоя $h_2 = 50$ см;

3 слой (основание): суглинок, модуль упругости $E_{осн} = 28$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu_{осн} = 0,35$, $h_{осн} = \infty$ (упруго-изотропное полупространство).

Давление в шинах АТС принималось $P = 0,83$ МПа, диаметр отпечатка движущегося колеса $D = 42$ см. Общая толщина засыпки над шельгой трубы $H = 80$ см, общий модуль упругости на поверхности покрытия $E^{экс} = 115,6$ МПа.

Касательные силы принимались в долях от нормальной нагрузки $F = 0,1Q$, $F = 0,5Q$ и $F = 0,9Q$. Результаты расчётов нормальных напряжений в слоистом массиве над трубой с учётом действия касательных сил на поверхности представлены на рис. 5.

Параметры расчетного АТС:

$Q_i^{экс} = 120,02$ кН, $p = 0,83$ МПа, $D = 42$ см

Касательные силы (в долях от нормальной нагрузки Q):

1 - $F = 0,1Q$, 2 - $F = 0,5Q$, 3 - $F = 0,9Q$.

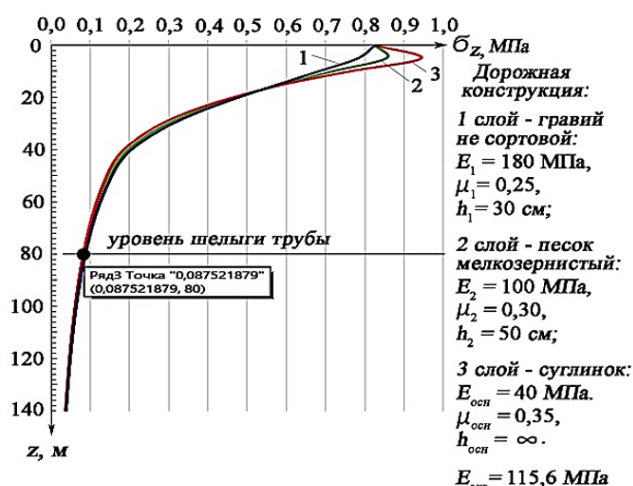


Рис. 5. Результаты распределения нормальных напряжений в трёхслойной дорожной конструкции

Анализ графиков нормальных напряжений в массиве по оси трубы приводит к следующим выводам.

1. Горизонтальные силы от транспортной нагрузки затухают на уровне дорожной одежды и на напряженное состояние стенок трубы влияния не оказывают.

2. Вертикальное давление от принятой транспортной нагрузки на уровне шельги трубы составляет 0,0875 МПа, что хорошо верифицируется на примерах расчетов в нормативных документах. В частности, расчет по упрощенной формуле (1) при тех же исходных данных дает почти такой же результат

$$q_{mp} = \frac{0,478 \cdot 120,02}{0,8^2 \cdot 10^3} = 0,0896 \text{ МПа,}$$

но при этом форма эпюры распределения напряжений значительно отличается от трапециoidalной, особенно в зоне $z = 0,20 \dots 0,80$ м. Этим, возможно, и объясняется рекомендация по толщине слоя засыпки дорожных водопропускных труб из полимерных материалов $z \geq 0,8$ м в нормативном документе [16].



Рис. 6. Схемы приложения нагрузки ($Q_2^{экр} < Q_3^{экр}$) и эпюры реактивных давлений P грунта на уровне постели плиты

Определение контактных напряжений по способу 2 передачи транспортной нагрузки производилось применительно к наиболее распространенным на лесовозных дорогах железобетонным плитам ПДЗ-1. Расчёты велись на действие эквивалентных динамических нагрузок от тележки мостов расчётного автопоезда Mercedes-Benz Actros 3346 S + SH-368.

Дорожная конструкция принималась аналогичной способу 1, дорожная плита заглублена в слой покрытия заподлицо с ездовой поверхностью (рис. 3). С учетом этого, значение расчётного эквивалентного модуля упругости постели под плитой было пересчитано до $E_{экр} = 95,4$ МПа. Размерные параметры и характеристики жесткости плиты ПДЗ-1 принимались согласно ОСТ 13-79-85 «Плиты железобетонные для покрытий автомобильных лесовозных дорог».

С целью определения наиболее неблагоприятной с точки зрения контактных напряжений схемы передачи нагрузки рассматривались три варианта позиций тележки мостов при движении на плите (рис. 6). Расчёты производились по формулам (6)–(14), с постоянным контролем выполнения условий прилегания (15), по составленной ПЭВМ-программе, обеспечивающей перебор вариантов с задаваемым шагом параметра x . Отметим, что отрицательных значений реактивного давления грунта (отставания плиты от постели) не было получено ни в одной из схем передачи нагрузки, что свидетельствует о правильности предпосылок и приняты исходных данных.

В связи с тем, что ширина плиты ПДЗ-1 равна 1 м, а ширина установленного на ней двухскатного колеса автопоезда 0,66 м, значения реактивных давлений P_0 в плоскости Y-Y были пересчитаны (увеличены) из-за вероятного эксцентриситета колес от середины плиты на край по формуле

$$P(y) = \frac{2P_0}{\pi \sqrt{1 - (y/b)^2}}, \quad (16)$$

где y – координата точки, в которой определяется давление $P(y)$, м, $y = 0,34/2$; b – половина ширины плиты, м, $b = 0,5$.

Результаты расчётов представлены в виде эпюр реактивных давлений на нижнюю плоскость плиты для

трёх вариантов позиционирования 2-х наиболее нагруженных осей расчётного АТС на плите (рис. 6). Максимальные контактные напряжения имеют место в сечущей плоскости Y-Y при $x = 1,22$ м (вблизи продольной оси трубы), они составляют $P_{x=1,22} = 86,6$ кПа.

Однако в данной ситуации практический интерес представляют не эпюры (законы) распределения контактных напряжений под плитой, а величина вертикального давления от транспортной нагрузки на уровне шельги трубы. Для её определения воспользуемся решением задачи плоской деформации А. Фламана для нормальных напряжений в грунте σ_z от действия произвольной распределенной нагрузки конечной ширины [19]:

$$\sigma_z = \frac{2P_0}{\pi} \left[\frac{l b z (l^2 + b^2 + 2z^2)}{(l^2 + z^2)(b^2 + z^2)\sqrt{l^2 + b^2 + z^2}} + \arctg \left(\frac{1}{z} \cdot \frac{l b}{\sqrt{l^2 + b^2 + z^2}} \right) \right], \quad (17)$$

где l – половина длины подошвы плиты, м, $l = 1,5$; z – текущее значение глубины от низа плиты, м.

Результаты расчетов напряжений σ_z в сечущей на $x = 1,22$ м плоскости Y-Y представлены в виде эпюры вертикального давления на рис. 7.

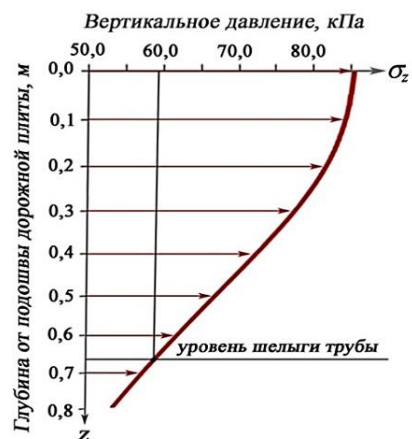


Рис. 7. Распределение напряжений от транспортной нагрузки в грунтовом массиве под плитой

В данной ситуации, при контактных напряжениях на подошве плиты 86,6 кПа вертикальное давление на уровне шельги трубы составляет 58,04 кПа, что меньше в сравнении со способом 1 передачи нагрузки на 33,7 %.

Выводы. Силовое воздействие специализированного подвижного состава лесовозных дорог на дорожное покрытие существенно отличается от воздействия транспортной нагрузки на покрытия дорог общего пользования. Стандартные осевые нагрузки А1 и А2, которые установлены для расчетов нежестких дорожных одежд в [14], и временные вертикальные нагрузки для расчетов водопропускных труб, принятые в [11], не соответствуют реальным нагрузкам от автопоездов-сортиментовозов, обращающихся на лесовозных дорогах в настоящее время.

Для разрешения данной коллизии предлагаем определять индивидуально для АТС, принятого в качестве расчетного автомобиля, значения максимальных эквивалентных динамических сил, передаваемых его коле-

сами на ездовую поверхность, по изложенной выше методике. Такой подход более адекватно отражает силовое воздействие многоосных тяжелых автопоездов-сортиментовозов на конструкции лесовозных дорог.

Теоретическая проработка двух способов передачи транспортной нагрузки на поверхность гибкой водопропускной трубы приводит к выводу, что их можно применять при проектировании водопропускных труб, дифференцированно назначать их кольцевую жесткость и подбирать необходимые параметры материала засыпки трубы над шельгой и в пазах траншеи. При этом использование в качестве защиты дорожной железобетонной плиты позволяет уменьшить вертикальное давление на трубу до 33,7 %.

Материал данного теоретического исследования послужит базой для экспериментальной проверки значений и характера передачи давления от транспортных нагрузок на гибкие водопропускные трубы в конструкциях лесных дорог.

Литература

1. Чернова Е.М. Создание статистических моделей лесных дорог Архангельской области : магистерская диссертация / Е.М. Чернова. Науч. руководитель А. М. Меньшиков. – Архангельск : Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2013. – С. 46.
2. Меньшиков А.М. Дороги и подвижной состав лесозаготовительных предприятий : учеб. пособие / А.М. Меньшиков. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 300 с. ISBN 978-5-9729-1181-3.
3. Меньшиков А.М. О применении полимерных водопропускных труб в конструкциях лесовозных дорог / А.М. Меньшиков, М.Ю. Платонов // Инженерные задачи: проблемы и пути решения : сб. научных трудов по итогам II Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. Высшей инженерной школы САФУ 26.11.2020. – Архангельск : Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2021. – С. 154–157.
4. Милосердов И.Д. Определение напряжений в дорожных одеждах лесовозных автодорог с учетом действия касательных сил от колес тяжеловесных автопоездов / И.Д. Милосердов, А.М. Меньшиков // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2020: сб. научных трудов по итогам конференции 13–17 апреля 2020 г. В 2-х томах. Т. 2. – Архангельск : Изд-во САФУ, 2020. – С. 109–114.
5. Методические рекомендации по проектированию и строительству безнапорных канализационных сетей, водосточков, дренажей и кабельной канализации дорог и аэродромов с применением пластмассовых профилированных труб КОРСИС, КОРСИС ПРО, КОРСИС ПЛЮС, ПЕРФОКОР и ЭЛЕКТРОКОР. – Балашиха : СоюздорНИИ, 2009. – 96 с.
6. ТУ 2248-001-73011750-2005 Технические условия. Трубы из пластмассы двухслойной профилированной стенкой для безнапорных трубопроводов КОРСИС и КОРСИС ПРО. С изм. № 1–2. – М. : ООО «Евротрубпласт», 2005. – 30 с.
7. ТУ 2248-005-73011750-2005. Технические условия. Трубы из пластмассы «КОРСИС ПЛЮС» для водоотведения и канализации. – М. : ООО «Полипластик Центр», 2005. – 19 с.
8. ТР-101-07. Технические рекомендации. Проектирование и строительство подземных сетей водоотведения из безнапорных пластмассовых труб с двухслойной стенкой КОРСИС. – М. : ОАО «Союзводоканалпроект», 2007. – 68 с.
9. СП 40-102-2000. Свод правил. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. Общие требования. – М. : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001. – 41 с.
10. ОДН 218.046-01. Отраслевые дорожные нормы. Проектирование нежестких дорожных одежд. – М. : Информавтор, 2001. – 145 с.
11. СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. – М. : Минрегион России, 2010. – 347 с.
12. Швабауэр В.И. Расчет подземного трубопровода из термопластов [Электронный ресурс] / В.И. Швабауэр, И. Гвоздév : <http://www.pe-pipe.365.ru/ASTM/raschet.pdf> (дата обращения: 06.04.2025)
13. Janson, L-E. Plastics pipes – How long can they last? Report №4: Stocholm, Sweden. – November, 1996. – 43 p.
14. ГОСТ Р 71404-2024 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. Утвержден и введен в действие приказом федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 августа 2024 г. – № 1022-ст.
15. Симвулиди И.А. Расчет инженерных конструкций на упругом основании : учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. / И.А. Симвулиди. – М. : Высш. шк., 1987. – 576 с.
16. ОДМ 218.3.053–2015. Отраслевой методический документ. Рекомендации по применению водопропускных труб из полимерных композиционных материалов. – М. : ФДА Росавтодор, 2021. – 124 с.
17. Чернякевич В.И. Распределение контактных напряжений в грунтовом основании дорожного покрытия из железобетонных плит / В.И. Чернякевич // Лесной вестник, № 6. – Мытищи : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – С. 88–90.
18. Методическое пособие по проектированию и монтажу наружных сетей водоотведения из полипропиленовых гофрированных труб SN8, SN10, SN16 и SN24. – Санкт-Петербург : ООО «Икапласт», 2020. – 76 с.
19. Горбунов-Посадов М.И. Расчет конструкций на упругом основании / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова. – М. : Стройиздат, 1984. – 679 с.

References

1. Chernova E.M. Creation of statistical models of forest roads in the Arkhangelsk region: master's thesis / E.M. Chernova //

- Scientific supervisor A.M. Menshikov. – Arkhangelsk : Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2013. – P. 46.
2. Menshikov A.M. Roads and rolling stock of logging enterprises: a textbook / A.M. Menshikov. – M. ; Vologda: Infra-Engineering, 2023. – 300 p. – ISBN 978-5-9729-1181-3.
3. Menshikov A.M. On the use of polymer culverts in logging road structures / A.M. Menshikov, M.Y. Platonov // Engineering tasks: problems and solutions: collection of scientific papers based on the results of the II All-Russian (national) Scientific and Practical Conference of the Higher Engineering School of NArFU on 11.26.2020. – Arkhangelsk : Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, 2021. – Pp. 154–157.
4. Miloserdov I.D. Determination of stresses in the road clothes of logging roads, taking into account the action of tangential forces from the wheels of heavy-duty road trains / I.D. Miloserdov, A.M. Menshikov // Lomonosov scientific readings of students, postgraduates and young scientists. – 2020: collection of scientific papers on the results of the conference on April 13–17, 2020 In 2 volumes. Vol. 2. – Arkhangelsk : NArFU Publishing House, 2020. – Pp. 109–114.
5. Methodological recommendations on the design and construction of unpressurized sewer networks, drains, drains and cable sewerage of roads and airfields using plastic profiled pipes CORSIS, CORSIS PRO, CORSIS PLUS, PERFORATOR and ELECTROCORE. – Balashikha : Soyuzdornii Publ., 2009. – 96 p.
6. Technical specifications 2248-001-73011750-2005. Double-layer profiled plastic pipes for pressure-free pipelines of CORSIS and CORSIS PRO. With amendments № 1-2. – Moscow : Eurotrubplast LLC, 2005. – 30 p.
7. Technical specifications 2248-005-73011750-2005. Plastic pipes "CORSIS PLUS" for drainage and sewerage [Text]. – Moscow: Polyplastic Center LLC, 2005. – 19 p.
8. Technical recommendations TR-101-07. Design and construction of underground drainage networks from pressure-free plastic pipes with a double-layer CORSIS wall [Text]. – Moscow: JSC Soyuzvodokanalproekt, 2007. – 68 p.
9. Set of rules 40-102-2000. A set of rules. Design and installation of pipelines for water supply and sewerage systems made of polymer materials. General requirements. – Moscow: Gosstroy of Russia, GUP CCP, 2001. – 41 p.
10. Industry Road Codes (and Standards) 218.046-01. Industry road regulations. Designing non-rigid travel clothes. – Moscow : Informavtodor Publ., 2001. – 145 p.
11. Set of rules 35.13330.2011 Bridges and pipes. Updated edition of SNP 2.05.03-84. – M. : Ministry of Regional Development of Russia, 2010. – 347 p.
12. Shvabauer V., Gvozdev I. Calculation of an underground pipeline made of thermoplastics [Electronic resource]: <http://www.pe-pipe.365.ru/ASTM/raschet.pdf> (accessed 04.06.2025)
13. Janson L-E. Plastics pipes - How long can they last? Report №4: Stockholm, Sweden. – November, 1996. – 43 p.
14. GOST (State Standard) 71404-2024 Public roads. Non-rigid travel clothes. Design rules. Approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated August 5, 2024. – №. 1022-art.
15. Simvulidi I.A. Calculation of engineering structures on an elastic base: a textbook for universities. – 5th ed., revised. and additional / I.A. Simvulidi. – M. : Higher School of Economics, 1987. – 576 p.
16. ODM (Road guidance document) 218.3.053–2015. An industry methodological document. Recommendations for the use of culverts made of polymer composite materials. – Moscow: Federal Road Agency Rosavtodor, 2021. – 124 p.
17. Chernyakevich V.I. Distribution of contact stresses in the soil base of the pavement made of reinforced concrete slabs / V.I. Chernyakevich // Forest Bulletin, № 6. – Mytishchi : Bauman Moscow State Technical University, 2007. – Pp. 88–90.
18. Methodical manual on the design and installation of outdoor drainage networks from polypropylene corrugated pipes SN8, SN10, SN16 and SN24. – St. Petersburg: Ikaplast LLC, 2020. – 76 p.
19. Gorbunov-Posadov M.I. Calculation of structures on an elastic base / M.I. Gorbunov-Posadov, T.A. Malikova. – M. : Stroyizdat, 1984. – 679 p.