

УДК 629.463.32

## К вопросам транспортировки гептила железнодорожным транспортом

Н. Д. Лапшин, В. А. Миленьких, С. В. Дульнева, Е. Г. Асманкин, Т. А. Сильянова

Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, Образцова, 9

**Для цитирования:** Лапшин Н. Д., Миленьких В. А., Дульнева С. В., Асманкин Е. Г., Сильянова Т. А. К вопросам транспортировки гептила железнодорожным транспортом // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 835–842. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-835-842

### Аннотация

**Цель:** Оценить свойства гептила и его воздействие на организм человека и окружающую среду. Представить для ознакомления сферы применения гептила и особенности его транспортировки железнодорожным транспортом. Рассмотреть конструктивные особенности вагона-цистерны модели 15-629 и произвести расчет для подбора оптимальной площади сечения впускного отверстия для предохранительного клапана с целью увеличения безопасности при транспортировке гептила вагоном-цистерной модели 15-629. **Методы:** Используя технические характеристики шестиосной, сочлененной цистерны модели 15-629, произвести расчет площади внутренней и наружной площадей поверхности котла. Далее проведем вычисления массового расхода воздуха через впускной предохранительный клапан и определим тепловой поток, происходящий за счет внешней теплоотдачи котла цистерны в окружающую среду. Эти данные необходимы для оценки эквивалентного диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана. **Результаты:** Благодаря произведенным расчетам был определен более подходящий диаметр проходного сечения впускного предохранительного клапана, который обеспечит более безопасную транспортировку высокотоксичного компонента жидкостного ракетного топлива, применяемого как на российских ракетах-носителях («Космос», «Циклон», «Протон»), так и зарубежных (на американских ракетах семейства «Титан», французских РН семейства «Ариан», китайских РН семейства «Большой Поход» и др.). **Практическая значимость:** Гидразиновые горючие являются более энергетически эффективными по сравнению с углеводородным горючим, поэтому за последние годы увеличилось применение НДМГ. Из-за стремительного развития космической промышленности возрастает количество грузовых перевозок гептила на железнодорожном транспорте. Дабы предотвратить техногенные катастрофы, были произведены расчеты диаметра впускного предохранительного клапана для минимизирования разгерметизации вагона-цистерны вне зависимости от температурных условий.

**Ключевые слова:** Транспортировка гептила, железнодорожный транспорт, предохранительный клапан вагона-цистерны, расчет оптимальной площади сечения впускного отверстия для предохранительного клапана, свойства гептила.

### Введение.

#### Характеристика ракетного топлива

Гептил, или несимметричный диметилгидразин (НДМГ), — это высокотоксичное жидкое химическое соединение, органический растворитель из группы ациклических альдегидов. Явля-

ется компонентом высококипящего ракетного топлива. Его химическая формула —  $C_7H_{14}O$ , молекулярная масса — 114 г/моль. Он представляет из себя бесцветную прозрачную жидкость, обладает характерным для аминов резким запахом и температурой кипения 63 градуса по Цель-

сию; легко растворяется в воде и спиртах; летуч; является сильным восстановителем; имеет высокую плотность около 0,83 г/мл [1]. Также гептил используется в промышленности в качестве растворителя для различных материалов, лакокрасочных средств, фармацевтики, пластика, резины и пищевых добавок. Применяется в производстве полиуретанов и других полимерных материалов. Может быть использован в качестве промышленного растворителя для этилцеллюлозы, жирных кислот и некоторых других веществ.

Гептил — компонент ракетного топлива, которое используется как в космической, так и в военной промышленности, его необходимость с каждым годом будет только увеличиваться. Большая часть перевозок гептила осуществляется железнодорожным транспортом в специальных ВЦ, одной из которых является модель 15-629. При несрабатывании предохранительного клапана цистерна может потерять устойчивость от избыточного давления или схлопнуться из-за вакуума, обе эти ситуации приведут к разливу груза. В данной статье рассматривается одно из экономически выгодных решений — это изменение диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана для обеспечения безопасности при транспортировке нефтепродуктов железнодорожным транспортом.

Данное вещество относят к первому классу опасности, предельная допустимая концентрация для водоемов — 0,01 мл/л, безопасный уровень концентрации в атмосферном воздухе — 0,001 мг/м<sup>3</sup> [2]. Самым опасным источником отравления является вдыхание паров. Гептил (НДМГ) при воздействии на людей поражает буквально все системы человека, начиная с того, что он является канцерогенным веществом, и поражает иммунную систему, сердечно-сосудистую, лимфатическую, нервную систему, желудочно-кишечный тракт, печень, кожу, а также вызывает нарушение репродуктивной деятельности. НДМГ по физиологическому

воздействию на живые организмы можно классифицировать как суперэкоотоксикант [3]. Периодическому медицинскому осмотру ежегодно подлежит 410 чел., контактирующих с основной вредностью. Распределение по полу: 72,5 % работающих — мужчины, 7,5 % — женщины. Средний возраст составил 45,6 года, около 60 % имеют стаж работы более 10 лет. Структура заболеваний, зарегистрированных у работающих в контакте с несимметричным диметилгидразином (НДМГ), стабильна на протяжении анализируемого периода. Первые ранговые места занимают болезни системы кровообращения — 27,3 %; болезни органов дыхания — 3,3 %; болезни органов пищеварения — 11,5 %; болезни мочеполовой системы — 10,5 %; болезни глаз — 8,2 % [4].

Главный вывод о влиянии гептила на организм человека — гидразин оказывает преимущественно гепатотропное и нейротропное действие на организм человека [5, 6].

По классификации опасных грузов НДМГ причисляется к легковоспламеняющимся жидкостям, т. е. к 3 классу. По правилам перевозки по железным дорогам опасных грузов допускаются только те грузы, которые находятся в алфавитном указателе опасных грузов, допущенных к перевозке железнодорожным транспортом. Погрузка опасных грузов запрещается без проведения технического осмотра специальных вагонов и подтверждения их годности для транспортировки опасных грузов. Вагоны, транспортирующие данный вид грузов, обязаны обладать маркировками знака опасности (номер знака опасности для гептила — 368) [7]. Данные знаки опасности могут быть удалены исключительно только после выгрузки опасного вещества. Маркировки и знаки опасности также обязаны находиться на порожних неочищенных вагонах, соответствующих перевозимому в них грузу. Транспортировка НДМГ, а также порожней тары из-под этого груза должна осуществляться в специализированных

вагонах исключительно повагонными или контейнерными отправлениями [8].

Несимметричный диметилгидразин, как и большая часть АХОВ, перевозится железнодорожным транспортом в специальных вагонах — вагонах-цистернах. Вагон-цистерна (далее — ВЦ) — это вид подвижного состава для перевозки жидкостей, сжиженных газов, нефтепродуктов и химически активных веществ.

### **Транспортировка гептила железнодорожным транспортом**

Цистерны для перевозки гептила являются специальными емкостями, созданными для безопасной и эффективной перевозки гептила, который является очень токсичным материалом, используемым в промышленности в качестве растворителя и в других химических процессах. Цистерны для перевозки гептила должны быть изготовлены из материалов, которые не реагируют с гептилом, имеют высокую степень герметичности и специальную систему вентиляции для предотвращения образования паров. Кроме того, цистерны должны быть достаточно прочными, чтобы выдерживать давление, которое создается внутри них во время перевозки. Также следует отметить, что перевозка гептила является опасной деятельностью, требующей соблюдения специальных правил и мер безопасности. Для перевозки гептила должны быть использованы специально обученные водители и специализированное оборудование. Кроме того, цистерны для перевозки гептила должны проходить регулярную проверку на условия, соответствующие безопасности, а также должны соответствовать соответствующим стандартам и нормам.

Для перевозки гептила используют шестиосную, сочлененную цистерну модели 15-629. Эта модель выпускается серийно с 2019 г. по сегодняшний день, срок службы вагона 40 лет. Данный вагон можно эксплуатировать в температурном

интервале от минус 60 до плюс 50 градусов Цельсия. После окончания срока службы независимо от состояния вагона эксплуатация должна быть прекращена. Данная цистерна состоит из двух секций, каждая секция оборудована автоматическим и стояночным тормозом (тормозная система должна сохранять свою работоспособность при температурах от минус 60 до плюс 55 °С) и имеет котел с полурамами, к которым крепится котел вагона. Котел данной цистерны выполнен из стали марки 09Г2С. Толщина обечаяек 8 мм, а толщина днища 10 мм. Обечайки вагона состоят из нескольких частей, а именно из двух средних обечаяек и двух крайних (для одной секции вагона). Средняя обечайка имеет уклон 0°40' к сливному прибору, что обеспечивает полный слив нефтепродукта. Объем данного вагона составляет 160 м<sup>3</sup>, объем одной секции равен 80 м<sup>3</sup>. Внутренний номинальный диаметр котла цистерны равен 3120 мм. Каждая секция ВЦ оснащена предохранительно-впускным клапаном, внутренними и наружными лестницами, люком-лазом, сливным прибором, бобышкой заземления, козырьком. Предохранительно-впускной клапан необходим для предотвращения избыточного давления и для ликвидации вакуума в котле. Рабочее давление в котле вагона не должно превышать 0,069 МПа, а расчетное 0,32 МПа. Рабочее давление предохранительного и впускного клапана 0,26 МПа и минус 0,015 МПа. Также клапан оборудован пламегасителем, что предотвращает возгорание продукта внутри котла при пожаре. К обслуживанию ВЦ модели 15-629 допускаются лица старше 18 лет, ознакомленные с конструкцией ВЦ, с правилами оказания первой помощи, с правилами техники безопасности при работе с перевозимым продуктом, прошедшие медицинское обследование, обучение и сдавшие экзамены. Категорически запрещается эксплуатация вагона при неисправности ходовой части, при температурах от минус 60 до плюс 50 °С, при нарушении герме-

Таблица 1. Технические характеристики шестиосной, сочлененной цистерны модели 15-629

Физическая величина	Размерность	Величина
Материал стенок котла (сталь 09ГС 2)		
Плотность стали	кг/м <sup>3</sup>	7800
Удельная теплоемкость стали	Дж/(кг · К)	480
Коэффициент теплопроводности стали	Вт/(м · К)	58
Объем цистерны	м <sup>3</sup>	80
Внутренняя поверхность котла	м <sup>2</sup>	122,96319
Наружная поверхность котла	м <sup>2</sup>	123,83027
Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности котла цистерны (капельная конденсация пара [9])	Вт/(м <sup>2</sup> · К)	362,3
Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности котла цистерны (естественная конвекция воздуха [9])	Вт/(м <sup>2</sup> · К)	17,6

тичности разъемных соединений, предохранительно-впускного клапана и сливного прибора. При эксплуатации цистерны необходимо проводить техническое освидетельствование каждого котла.

Один из способов увеличения безопасности транспортировки гептила является подбор оптимальной площади сечения впускного отверстия для предохранительного клапана ВЦ модели 15-629 (табл. 1).

При проведении технологических операций с котлом цистерны, таких как очистка или слив нефтепродукта, возможно образование вакуума в цистерне. Это связано с тем, что котел цистерны при проведении данных операций нагревают до 80 °С, а затем котел ВЦ в закрытом состоянии может попасть в условия с более низкой температурой, что может привести к деформации стенок котла. Во избежание деформаций стенок в цистернах предусмотрен впускной предохранительный клапан.

Для дальнейшего анализа проходного сечения клапана будем исходить из гипотезы, что поток теплоты, вносимый воздухом через клапан, должен компенсировать тепловой поток за счет внешней теплоотдачи котла ВЦ в окружающую среду.

### Расчеты

Для расчета площади наружной и внутренней поверхности котла воспользуемся формулами:

$$S_{\text{внутр}} = S_o + 2S_d; \quad (1)$$

$$S_{\text{наружн}} = S'_o + 2S'_d; \quad (2)$$

$$S_{\text{внутр}} = 2\pi \cdot 9425 \cdot 1560 \cdot 10^{-6} + 4\pi \cdot 1560^2 \cdot 10^{-6} = 122,96319 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{наружн}} = 2\pi \cdot 9425 \cdot (1560 + 8) \cdot 10^{-6} + 4\pi \cdot (1560 + 10)^2 \cdot 10^{-6} = 123,83027 \text{ м}^2,$$

где  $S_o$  — площадь обечайки без учета толщины;  
 $S'_o$  — площадь обечайки с учетом толщины;  
 $S_d$  — площадь днища без учета толщины;  
 $S'_d$  — площадь днища с учетом толщины.

При расчете площади наружной и внутренней поверхности котла были приняты следующие допущения:

$$S_{\text{шар}} = 2S_d, \quad S'_{\text{шар}} = 2S'_d.$$

Запишем формулу для расчета теплового потока воздуха, вносимого в цистерну через клапан:

$$Q_B = c_{\text{PB}} G \chi (t_T - t_0), \quad (3)$$

где  $c_{pB}$  — удельная изобарная теплоемкость воздуха;

$t_T$  — температура технологического процесса;

$t_O$  — температура окружающей среды;

$\chi = \frac{0,1}{1}$  — коэффициент, характеризующий

степень нагрева поступающего воздуха;

$G$  — массовый расход воздуха через впускной предохранительный клапан.

$$G = \mu S \sqrt{2\rho_B \Delta P}, \quad (4)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода;

$S$  — эквивалентная площадь проходного сечения впускного предохранительного клапана;

$\rho_B$  — плотность воздуха;

$\Delta P$  — перепад давления, при котором срабатывает впускной предохранительный клапан.

Запишем формулу для вычисления теплового потока за счет внешней теплоотдачи котла цистерны в окружающую среду:

$$Q_{CP} = kF(t_T - t_O), \quad (5)$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{362,3} + \frac{58}{58} + \frac{1}{17,6}} = 0,943772, \quad (6)$$

где  $\alpha_1$  — коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности котла цистерны;

$\alpha_2$  — коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности котла цистерны;

$\lambda_{CT}$ ,  $\delta_{CT}$  — коэффициент теплопроводности материала стенки котла и коэффициент толщины стенки котла;

$F$  — внешняя поверхность котла цистерны.

Для недопущения снижения давления в котле цистерны после открытия впускного предохранительного клапана необходимо выполнение условия.

$$Q_B = Q_{CP}. \quad (7)$$

Из уравнений (3–7) получим формулу для оценки эквивалентного диаметра  $D$  проходного сечения впускного предохранительного клапана:

$$D = \sqrt{\frac{4k \cdot F}{\pi c_{pB} \cdot \chi \cdot \mu \cdot \sqrt{2\rho_B \cdot \Delta P}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,943772 \cdot 123,83027}{\pi \cdot 1,004 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 0,7 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,225 \cdot 0,275 \cdot 10^5}}} = 0,0903153 \text{ м}. \quad (8)$$

## Результаты

Расчет произведем для цистерны модели 15-629 (табл. 2) для следующих характеристик предохранительного клапана:  $\Delta P = 0,275 \cdot 10^5$  Па,  $\mu = 0,7$  и температуры окружающей среды  $t_O = 15$  °С. Для определения коэффициентов теплоотдачи воспользуемся критериальными уравнениями для естественной конвекции.

Таблица 2. Расчет диаметра проходного сечения предохранительного клапана вагона-цистерны 15-629

$\chi$	0,1	0,5	1,0
$D$ , м	0,0903153	0,0403902	0,0285602

## Заключение

Транспортировка нефтепродуктов железнодорожным транспортом — один из самых безопасных способов транспортировки данного вида топлива с учетом размеров, а также климатических зон Российской Федерации. Исходя из увеличивающихся потребностей страны в объемах нефтепродуктов для различных отраслей промышленности вопрос транспортировки различных нефтепродуктов, особенно гептила, является особенно актуальным на

данный момент. В статье рассмотрены характеристики специализированных цистерн для транспортировки гептила, а также других нефтепродуктов. Действующие методики расчетов устойчивости котлов проводятся в соответствии с требованиями «Норм для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)». Стоит отметить, что методика утверждена заместителем министра путей сообщения РФ А. Н. Кондратенко 23 декабря 1999 г. и введена с 1 февраля 2000 г. За последние двадцать лет изменился маршрут транспортировок нефтепродуктов, а соответственно, и перепад среднесуточных давлений и температур. В статье предлагается расчет оптимальных проходных сечений предохранительного клапана одной из действующих цистерн для перевозки гептила на основе теплофизических процессов — с учетом как максимальных изменений температур внутри и снаружи котла вагона цистерны, так и минимальных. Расчет проводился в соответствии с современной географией железнодорожных путей в России [10].

Вопрос транспортировки нефтепродуктов в дальнейшем следует рассматривать и с точки зрения недопущения возникновения вакуума в котле вагона цистерны путем установки двух предохранительных клапанов, недопущения возникновения разряжения, а также избыточного давления внутри котла вагона-цистерны.

### Библиографический список

1. Панин Л. Е. Медико-социальные и экологические проблемы использования ракет на жидком топливе (гептил) / Л. Е. Панин, А. Ю. Перова. // Сибирский научный медицинский журнал. — Новосибирск, 2006. — 152 с.
2. Козловский В. А. Гигиеническое нормирование некоторых продуктов химической трансформации несимметричного диметилгидразина в почве / В. А. Козловский, Г. К. Эилрбеков, А. П. Позднякова и др. // Наука о жизни и здоровье. — 2014. — 79 с.
3. Ушакова В. Г. Особенности химических превращений НДМГ и его поведение в объектах окружающей

среды / В. Г. Ушакова, О. Н. Шпигун, О. И. Старыгин // Ползуновский вестник. — 2004.

4. Ломакин А. И. Токсическое воздействие несимметричного диметилгидразина (гептила) на организм человека / А. И. Ломакин, О. П. Трикман, Л. Э. Скрипкина и др. // Вестник Клинической больницы. — 2012. — № 51. — 105 с.

5. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду / Под общ. ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова. — М.: Анкил, 2000. — С. 640.

6. Мерков А. М. Санитарная статистика / А. М. Мерков, Л. Е. Поляков. — Л.: Медицина, 1974. — С. 384.

7. Распоряжение ОАО РЖД от 27 мая 2011 г. № 1150р «Об утверждении местных технических условий размещения и крепления специализированных контейнеров-цистерн длиной 20 футов, загруженных жидким грузом гептил, амил и порошков на платформах базой 9720 мм и 14720 мм».

8. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов. Справочное пособие. — М.: Министерство путей сообщения РФ, 1993. — 251 с.

9. Исаченко В. П. Теплопередача / П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — М.: Энергоиздат. 1981. — 417 с.

10. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). — М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996.

Дата поступления: 25.07.2023

Решение о публикации: 29.09.2023

### Контактная информация:

ЛАПШИН Никита Дмитриевич — студент кафедры «ППХ»; nikita\_lapshin2002@icloud.com  
 МИЛЕНЬКИХ Владислав Андреевич — студент кафедры «ППХ»; vlad1k.olad1k.qq@gmail.com  
 ДУЛЬНЕВА Стелла Викторовна — студент кафедры «ППХ»; stella3gek@gmail.com  
 АСМАНКИН Евгений Геннадьевич — ст. преподаватель кафедры «ХиИЭ»; asman08@yandex.ru  
 СИЛЬЯНОВА Татьяна Алексеевна — магистрант кафедры «ХиИЭ»; 1202871@edu.rut-miit.ru

## To Matters of Heptyl Transportation by Rail

N. D. Lapshin, V. A. Milenkikh, S. V. Dulneva, Ye. G. Asmankin, T. A. Sil'yanova

Russian University of Transport, 9, Obraztsova, Moscow, 127994, Russian Federation

**For citation:** Lapshin N. D., Milenkikh V. A., Dulneva S. V., Asmankin Ye. G., Sil'yanova T. A. To Matters of Heptyl Transportation by Rail // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 835–842. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-835-842

### Summary

**Purpose:** To estimate the properties of heptyl and its effect on the human body and the environment. To provide an overview of the sphere of heptyl application and the features of its transportation by rail. To consider the structural features of the model 15-629 tank car and to perform a calculation to select the optimal cross-sectional area for the inlet opening of the relief valve to enhance safety during the transportation of heptyl by the model 15-629 tank car. **Methods:** To calculate the inner and outer surface areas of the tank shell using the technical characteristics of the six-axis multi-unit tank-car of model 15-629. Next, we will calculate the mass air flow rate through the inlet relief valve and determine the heat transfer occurring due to the external heat dissipation from the tank shell into the surrounding environment. These data are necessary to estimate the equivalent diameter of the inlet relief valve orifice. **Results:** Thanks to the calculations performed, a more suitable diameter of the inlet safety valve orifice has been determined. This will ensure a safer transportation of highly toxic liquid rocket fuel components used in both Russian launch vehicles (“Kosmos”, “Cyclone”, “Proton”) and international ones (such as American “Titan” rockets, French launch vehicles of the “Ariane”, Chinese rockets of the “Long March” family, and others). **Practical significance:** Hydrazine-based propellants are more energy-efficient compared to hydrocarbon-based propellants, which has led to an increased usage of Unsymmetrical Dimethylhydrazine (UDMH) in recent years. Due to the rapid growth of space industry, the volume of heptyl transportation by railway has been increasing. In order to prevent technological disasters, calculations have been conducted to determine the diameter of the inlet relief valve to minimize depressurization of the tank car, regardless of temperature conditions.

**Keywords:** Transportation of heptyl, railroad transport, security valve of the tank car, calculation of the diameter of the inlet safety valve orifice, heptyl properties.

### References

1. Panin L. E., Perova A. Y. Mediko-sotsial'nye i ekologicheskie problemy ispol'zovaniya raket na zhidkom toplive (geptil) [Medical, social and environmental problems of using liquid-fueled rockets (heptyl)]. *Sibirskiy nauchnyy meditsinskiy zhurnal* [Siberian Scientific Medical Journal]. Novosibirsk, 2006, 152 p. (In Russian)

2. Kozlovsky V. A., Eilrbekov G. K., Pozdnyakova A. P. et al. Gigienicheskoe normirovanie nekotorykh produktov khimicheskoy transformatsii nesimmetrichnogo dimetilgidrazina v pochve [Hygienic rationing of some products of chemical transformation of asymmetric

dimethylhydrazine in soil]. *Nauka o zhizni i zdorov'e* [Life and Health Science]. 2014, 79 p. (In Russian)

3. Ushakova V. G., Shpigun O. N., Starygin O. I. Osobennosti khimicheskikh prevrashcheniy NDMG i ego povedenie v ob'ektakh okruzhayushchey sredy [Features of chemical transformations of NDMG and its behavior in environmental objects]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Bulletin]. 2004. (In Russian)

4. Lomakin A. I., Trikmán O. P., Skripkina L. E. et al. Toksicheskoe vozdeystvie nesimmetrichnogo dimetilgidrazina (geptila) na organizm cheloveka [Toxic effect of asymmetric dimethylhydrazine (heptyl) on the human body].

*Vestnik Klinicheskoy bol'nitsy* [Bulletin of Clinical Hospital]. 2012, Iss. 51, 105 p. (In Russian)

5. *Ekologicheskie problemy i riski vozdeystviy raketno-kosmicheskoy tekhniki na okruzhayushchuyu prirodnyuyu sredyu; pod obshch. red. V. V. Adushkina, S. I. Kozlova, A. V. Petrova* [Environmental problems and risks of missile impacts Space technology for the environment; general ed. V. V. Adushkina, S. I. Kozlova, A. V. Petrova]. Moscow: Ankil, 2000, p. 640. (In Russian)

6. Merkov A. M., Polyakov L. E. *Sanitarnaya statistika* [Sanitary statistics]. L.: Medicine, 1974, p. 384. (In Russian)

7. *Rasporyazhenie OAO RZhd ot 27 maya 2011 g. № 1150r "Ob utverzhdenii mestnykh tekhnicheskikh usloviy razmeshcheniya i krepleniya spetsializirovannykh konteynerov-tsistern dlinoy 20 futov, zagruzhennykh zhidkim gruzom heptil, amil i porozhnikh na platformakh bazoy 9720 mm i 14720 mm"* [Order of JSC Russian Railways dated 27.05.2011 № 1150r "On approval of local technical conditions for placement and fastening of specialized tank containers 20 feet long loaded with liquid cargo heptyl, amyl and empty on platforms with a base of 9720 mm and 14720 mm"]. (In Russian)

8. *Spetsializirovannyye tsisterny dlya perevozki opasnykh gruzov. Spravochnoe posobie* [Specialized tanks for the transportation of dangerous goods. Reference manual]. Moscow: Ministry of Railways of the Russian Federation Publ., 1993, 251 p. (In Russian)

9. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981, 417 p. (In Russian)

10. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Standards for the calculation and design of 1520 mm gauge railway carriages of the Ministry of Railways (non-self-propelled)]. Moscow: GosNIIV-VNIIZhT Publ., 1996. (In Russian)

Received: July 25, 2023

Accepted: September 29, 2023

Nikita D. LAPSHIN — Student, Department "Track and Railway Infrastructure Management"; nikita\_lapshin2002@icloud.com

Vladislav A. MILENKIKH — Student, Department "Track and Railway Infrastructure Management"; vlad1k.olad1k.qq@gmail.com

Stella V. DULNEVA — Student, Department "Track and Railway Infrastructure Management"; stella3gek@gmail.com

Evgeny G. ASMANKIN — Senior Lecturer, Department "Chemical Engineering and Environmental Protection"; asman08@yandex.ru

Tatiana A. SIL'YANOVA — Master's Degree Student, Department "Chemical Engineering and Environmental Protection"; 1202871@edu.rut-miit.ru