

УДК 629.463.3:532.5

А. А. МАРКАВЦОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Конструкторско-технический центр Белорусской железной дороги, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

## ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ДИНАМИКИ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖИДКИХ ГРУЗОВ В ЖЕСТКИХ И ЭЛАСТИЧНЫХ ЕМКОСТЯХ

Рассмотрены особенности подходов, применяемых при анализе динамики жидкостей, транспортируемых в жестких конструкциях (железнодорожные и автомобильные цистерны, танк-контейнеры) и эластичных емкостях (флекситанках). Обоснована целесообразность применения численных методов для моделирования системы «жидкость – мягкая оболочка – жесткий контейнер».

**Ключевые слова:** динамика жидких грузов, флекситанк, колебания жидкости, численное моделирование, прочность контейнера.

Традиционно для перевозки жидкостей используют жесткие конструкции: железнодорожные цистерны, автоцистерны и танк-контейнеры (ISO-танки). Главное отличие жидкого груза от твердого заключается в его подвижности: во время увеличения скорости, торможения или поворота транспортного средства жидкость смещается относительно емкости, что создает дополнительные силы инерции, которые могут привести к нарушению целостности железнодорожного подвижного состава, опрокидыванию автомобиля или разрушению самой емкости [1].

В отличие от закрепленного твердого груза вследствие наличия свободной поверхности жидкость реагирует на любые маневры транспортного средства перемещением своего центра масс. При совпадении частоты внешнего воздействия (например, вызывающего раскачивание вагона или автомобиля) с собственной частотой колебаний жидкости возникает явление резонанса. В этом режиме резко возрастает амплитуда волн внутри резервуара, что приводит к появлению значительных динамических нагрузок на стенки емкости и может вызвать потерю устойчивости транспортного средства [1, 5], а также создает прямую угрозу целостности несущего контейнера.

Конструкция стандартного ISO-модуля рассчитана преимущественно на вертикальные нагрузки (штабелирование), но имеет малую жесткость боковых стенок и дверей. При продольном ударе объем жидкости через мягкую оболочку давит на торцы контейнера. Возникает эффект «выпучивания»: стенки деформируются наружу, выходя за допустимые габариты, а запорные механизмы дверей испытывают критические перегрузки, что нередко приводит к их разрушению [3, 4].

С развитием мультимодальных перевозок всё большее распространение получают флекситанки [2], представляющие собой эластичный полимерный вкладыш, устанавливаемый внутрь стандартного двадцатифутового контейнера. Ключевой проблемой безопасности при использовании флекситанков является риск повреждения контейнера. Стандартный сухогрузный модуль конструктивно не рассчитан на интенсивные распирающие нагрузки изнутри. При резком торможении или сильной качке гидродинамический удар («волна») способен привести к деформированию торцевых и боковых стенок контейнера и выходу из строя запорных механизмов дверей [3, 4].

Целью данной работы является сравнительный анализ подходов к исследованию динамики систем, предназначенных для транспортировки жидкостей, при использовании емкостей различной жесткости.

В настоящее время анализ динамики транспортируемых жидких грузов является одной из самых сложных задач с аналитической точки зрения. Прямое численное моделирование движения жидкости требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому в современной инженерной практике сохраняется актуальность метода механических аналогов. Суть подхода заключается в замене сложной гидродинамической системы эквивалентной механической схемой, например, пружинно-массовыми аналогами (рисунок 1). Часть груза условно принимается неподвижной, а подвижная масса моделируется в виде математического маятника или пружинно-массового осциллятора. Параметры такой модели (массу подвижного элемента, жесткость пружины или длину подвеса) подбирают таким образом, чтобы совпадали собственные частоты колебаний аналога и реальной жидкости [6].

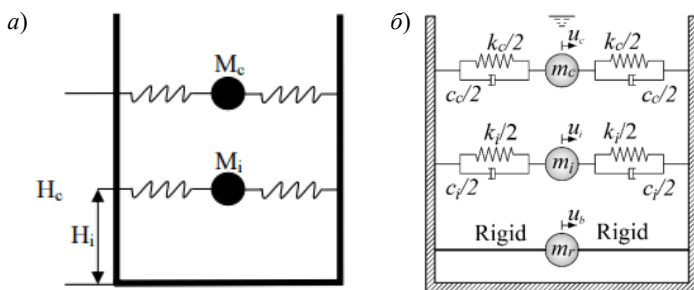


Рисунок 1 – Примеры пружинно-массовых моделей жидкостей:  
 а – без демпфера (гасителя колебаний) [7]; б – с демпфером [8]

Характер силового воздействия жидкости на резервуар зависит от вида транспорта. Для железнодорожных цистерн критическим расчетным случаем являются продольные инерционные нагрузки, возникающие при соударении вагонов во время маневровых работ [9]. В момент удара жидкость сохраняет

скорость движения и воздействует на днище котла, создавая значительные локальные давления. В случае автомобильных перевозок определяющим фактором является поперечная динамика. При прохождении поворотов жидкость смещается к внешней стенке цистерны, создавая дополнительный опрокидывающий момент. Анализ динамики автопоездов показывает, что при частичном заполнении цистерны порог устойчивости против опрокидывания существенно снижается по сравнению с перевозкой твердого груза аналогичной массы [10].

Одним из способов демпфирования колебаний жидкостей внутри жестких резервуаров является установка внутренних перегородок [11–16], как показано на рисунке 2. Их наличие позволяет разделить объем жидкости на области меньшего размера, тем самым увеличивая диссипацию кинетической энергии колебаний, которая возникает вследствие вихреобразования и гидравлического сопротивления. Наличие жестких стенок и волногасителей делает поведение системы предсказуемым, что принципиально отличает ее от мягких оболочек (флекситанков), где реализация подобных технических решений может привести к повышению стоимости изготовления.

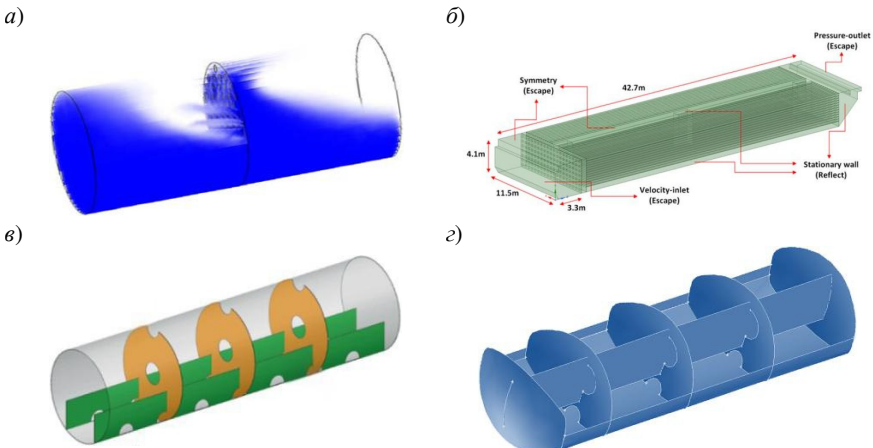


Рисунок 2 – Перегородки, устанавливаемые в жестких резервуарах для гашения колебаний жидких грузов:  
*a* – поперечная [12]; *б* – продольные [13]; *в, г* – комбинированные варианты [14, 15]

В жестких резервуарах геометрия стенок с течением времени не изменяется, поэтому при исследованиях рассматривается взаимодействие жидкости с абсолютно твердым телом. Расчет подобных конструкций сводится к анализу двух критериев: прочности обечайки (котла) при продольных ударных нагрузках и поперечной устойчивости для предотвращения опрокидывания на

криволинейных участках пути, которые могут быть выполнены как с использованием аналитических моделей, так и путем расчетов в таких специализированных пакетах инженерного анализа, как, например, ANSYS.

В отличие от жестких резервуаров флекситанк представляет собой мягкую оболочку объемом от 14 000 до 26 000 литров, которая не имеет собственного каркаса и внутренних перегородок-волнорезов [17, 18]. Его конструкция состоит из нескольких внутренних слоев полиэтилена и внешнего защитного каркаса из высокопрочного тканого полипропилена. Такая структура позволяет материалу эффективно поглощать и перераспределять внутренние напряжения, возникающие при движении жидкости. Для предотвращения механических повреждений эластичной оболочки используется внутреннее покрытие. Пол и боковые стенки контейнера облицовываются гофрированным картоном или листовым полипропиленом. Это создает защитный барьер, исключая абразивный износ и проколы флекситанка о неровности контейнера.

Флекситанк не имеет собственного жесткого каркаса, поэтому его форма определяется характеристиками перевозимого жидкого груза (таблица 1) и конструкцией внутренних стенок контейнера (рисунок 3).

Таблица 1 – Классификация жидких грузов, перевозимых во флекситанках

Категория	Номенклатура
<i>1 Пищевые продукты</i>	
Растительные масла и жиры	Подсолнечное, оливковое, пальмовое (рафинированное), соевое, кукурузное, рапсовое, арахисовое, кокосовое масла, масло рисовых отрубей, животные и рыбы жиры
Напитки и концентраты	Вина и виноматериалы, фруктовые соки, концентраты соков, минеральная вода, молоко
Сиропы и добавки	Глюкозно-фруктозные сиропы, патока, жидкий сахар, сорбит, натуральные подсластители, томатная паста, соусы
<i>2 Промышленные масла и горюче-смазочные материалы</i>	
Технические масла	Базовые масла, трансформаторные и белые масла, гидравлические жидкости
Смазочные материалы	Моторные и трансмиссионные масла, смазки, присадки
Биотопливо и сырье	БИО-дизель, отработанные растительные масла (UCO), жирные кислоты, глицерин
<i>3 Неопасная химия</i>	
Полимеры и эмульсии	Натуральный и синтетический латекс, полиолы, парафиновые эмульсии
Промышленная химия	Гликоли (антифризы), пластификаторы, моющие средства (ПАВ), жидкие удобрения, силикаты
Лакокрасочные и строительные материалы	Печатные краски на водной основе, жидкий битум (требует термоизоляции), покрытия

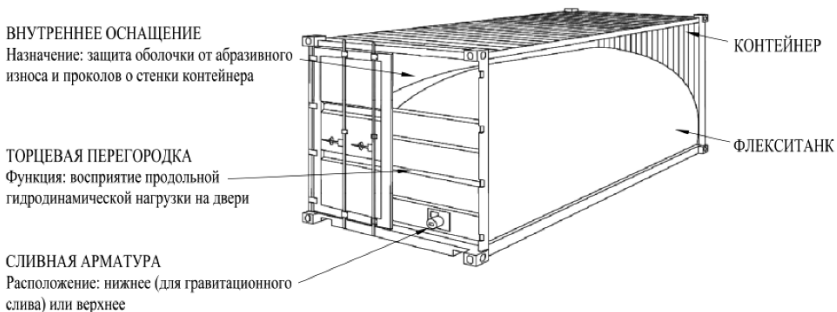


Рисунок 3 – Принципиальная конструкция флекситанка, устанавливаемого в стандартный двадцатифутовый контейнер [17]

В качестве внешней оболочки флекситанка используется стандартный 20-футовый контейнер с грузоподъемностью до 24 тонн. Особое внимание уделяется жесткости конструкции: гофрированные стенки помогают воспринимать распирающие нагрузки, а двери оснащаются двойными запорными штангами для обеспечения максимальной устойчивости торцевой части.

Критически важным элементом безопасности является торцевая перегородка, расположенная у дверей. Она представляет собой комбинированную конструкцию из картона или пластика, усиленную пятью поперечными металлическими балками, основная задача которой – принимать на себя продольные гидродинамические нагрузки, предотвращая давление груза непосредственно на двери контейнера.

Гашение энергии колебаний жидкости в такой системе происходит за счет вязкоупругой деформации самой оболочки и ее трения о пол и стенки контейнера. Здесь возникает сложная задача взаимодействия жидкости и конструкции (Fluid-Structure Interaction – FSI), где форма емкости постоянно меняется под действием волн. Применять к флекситанкам методы расчета, разработанные для жестких цистерн, некорректно, так как они не учитывают подвижность материала и изменение геометрии резервуара в процессе движения [19].

При движении флекситанка происходит волновое возмущение жидкости, которое непосредственно передается на оболочку, вызывая ее деформацию. Изменившаяся геометрия оболочки, в свою очередь, меняет граничные условия для жидкости [20]. В отличие от жестких резервуаров, где энергия колебаний жидкого груза расходуется на преодоление гидравлического сопротивления внутренних перегородок, во флекситанках диссипация энергии происходит за счет вязкоупругого растяжения материала вкладыша и сил трения оболочки о пол и стенки контейнера. Этот процесс имеет ярко выраженный нелинейный характер, что делает невозможным применение простых аналитических формул.

Описанный выше метод механических аналогов показывает высокую эффективность при условии неизменяемости формы сосуда [6]. Однако для

анализа динамики флекситанков с транспортируемой жидкостью указанный подход применять некорректно, поскольку он не учитывает изменение формы самой емкости. Если классический расчет предполагает, что жидкость колеблется внутри жесткого сосуда с неизменными границами, то во флекситанке процесс протекает иначе. При резком торможении жидкость накатывает на переднюю стенку, вызывая ее локальное вздутие. Оболочка растягивается спереди и опадает сзади. Поскольку геометрия резервуара постоянно меняется, описать это движение, используя модель простой колебательной системы невозможно. Например, моделирование жидкости математическим маятником с фиксированной длиной подвеса приводит к значительным погрешностям, занижая реальные нагрузки на конструкцию контейнера.

Моделирование перетекания жидкостей в гибких емкостях требует решения задач гидроупругости (FSI), то есть совместного решения уравнений движения жидкости и деформирования конструкции. В данный момент для этого применяются два основных подхода: сеточные методы и методы динамики сглаженных частиц (SPH) (рисунок 4).

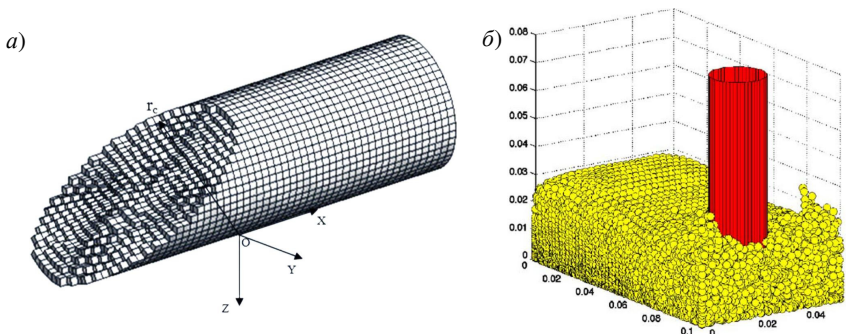


Рисунок 4 – Пример моделирования динамики жидкости в емкостях методами конечных объемов (элементов) (а) [15] и сглаженных частиц (SPH) (б) [26]

Классическим способом решения задач гидродинамики является использование расчетной сетки (методы конечных объемов или конечных элементов) [21, 22]. Чтобы учесть движение стенок резервуара применяют метод Эйлера – Лагранжа. В этом случае узлы сетки смещаются вслед за деформацией границ жидкости.

Однако при расчете флекситанков данный метод сталкивается с техническими трудностями. Из-за высокой эластичности материала оболочка испытывает большие перемещения, что приводит к чрезмерному растяжению и перекручиванию ячеек расчетной сетки. Критическое искажение сетки вызывает ошибки вычислений и часто приводит к аварийной остановке решения. Для продолжения расчета требуется постоянное перестроение сетки, что существенно усложняет алгоритм и увеличивает время моделирования [23].

Альтернативой сеточным алгоритмам выступают бессеточные методы, среди которых наибольшее распространение получил метод сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics). В рамках этого подхода жидкость представляется не как сплошная среда в ячейках, а как совокупность дискретных частиц, взаимодействующих друг с другом [24, 25].

Для задач с флекситанками метод SPH имеет принципиальные преимущества. Поскольку между частицами нет жестких связей (сетки), метод естественным образом описывает любые, даже самые сильные деформации и разбрызгивание жидкости (рисунок 3). Частицы свободно перемещаются внутри деформируемой оболочки, корректно передавая давление на стенки контейнера. Именно поэтому связку SPH (для жидкости) + метод конечных элементов (для контейнера) можно считать наиболее точным способом прогнозирования прочности транспортируемой системы.

Таким образом, на основании выполненного анализа можно сделать следующие выводы.

1 Вопросы динамики гибких емкостей проработаны недостаточно полно. Существующая теоретическая база не позволяет достоверно оценить влияние относительного смещения жидкости во флекситанке на напряженно-деформированное состояние стенок стандартного контейнера, что затрудняет прогнозирование его прочности.

2 Установлено, что механика движения жидкости во флекситанках отличается от процессов в жестких резервуарах. Если в цистернах колебания ограничиваются жесткими стенками и волногасителями, то во флекситанках реализуется сложное гидроупругое взаимодействие, где энергия гасится за счет деформации оболочки и трения.

3 Показано, что традиционные методы расчета, базирующиеся на механических аналогах (маятниковых моделях), неэффективны для эластичных емкостей. Игнорирование изменения геометрии резервуара и перераспределения масс при торможении («эффект растекания») может привести к существенным отклонениям.

4 Основным риском эксплуатации флекситанков является не неразрывность самой оболочки, а прочность стандартного ISO-контейнера. Доказано, что гидродинамические удары вызывают интенсивные распирающие нагрузки, приводящие к выпучиванию боковых стенок и разрушению запорных механизмов дверей, конструктивно не рассчитанных на внутреннее давление.

5 Анализ современных подходов к моделированию выявил преимущества бессеточных методов перед сеточными алгоритмами. В условиях больших деформаций оболочки наиболее точным инструментом прогнозирования является метод сглаженных частиц в связке с методом конечных элементов. Именно этот подход позволяет корректно описать поведение системы «жидкость – мягкая оболочка – жесткий контейнер» и может быть использован для проведения дальнейших исследований в области прочности гибких емкостей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Ibrahim, R. A.** Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications / R. A. Ibrahim. – Cambridge : Cambridge University Press, 2005. – 970 p.

2 **Машков, А. С.** Безопасный экспорт из России в Китай наливных грузов во флекситанках / А. С. Машков, Д. В. Ушаков // Форум молодых ученых. – 2021. – № 6 (58). – С. 505–508.

3 Flexible Tanks for Liquid Bulk Cargo : Recommended Best Practices / International Union of Marine Insurance (IUMI). – 2024. – URL: <https://iumi.com/wp-content/uploads/2025/01/Flexible-Tanks-for-Liquid-Bulk-Cargo-Recommended-Best-Practices.pdf> (дата обращения: 01.10.2025).

4 Report on the investigation into Flexitanks carried out by Germanischer Lloyd and commissioned by the GDV / Berlin : GDV. – URL: [https://www.tis-gdv.de/wp-content/uploads/tis\\_e/containe/flexitanks/flexitankuntersuch.pdf](https://www.tis-gdv.de/wp-content/uploads/tis_e/containe/flexitanks/flexitankuntersuch.pdf) (дата обращения: 01.10.2025).

5 **Goudarzi, M. A.** Investigation of nonlinear sloshing effects in seismically excited tanks / M. A. Goudarzi, S. R. Sabbagh-Yazdi // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2012. – Vol. 43. – P. 355–365.

6 **Farid, M.** Internal resonances and dynamic responses in equivalent mechanical model of partially liquid-filled vessel / M. Farid, O. V. Gendelman // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – Vol. 379. – P. 191–212.

7 **Kalantari, A.** Applicability of mass-spring models for seismically isolated liquid storage tanks / A. Kalantari, M. R. Nikoomanesh, M. A. Goudarzi // Journal of Earthquake and Tsunami. – 2019. – Vol. 13, is. 1. – Article 1950002. – 17 p.

8 Seismic response of a cylindrical liquid storage tank with elastomeric bearing isolations resting on a soil foundation / X. Meng, Y. Sun, C. Wang [et al.] // Infrastructures. – 2025. – Vol. 10, is. 6. – 18 p.

9 **Wang, Z.** Study on impact process of a large LNG tank container for trains / Z. Wang, C. Qian, W. Li // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, is. 3. – Article 1351. – 19 p.

10 Theory and experiments on driving stability of tank trucks under dangerous working conditions / D. Yu, X. Li, H. Liu [et al.] // Journal of Vibroengineering. – 2015. – Vol. 17, is. 5. – P. 2521–2534.

11 **Gegedesh, M.** Effectiveness evaluation of the liquid cargo oscillations damping in partially filled reservoirs of agricultural vehicles based on computer simulation / M. Gegedesh, G. Koshlya // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2624. – Article 030081. – 7 p.

12 **Kuzniatsova, M.** 3D modeling of liquid oscillations in reservoirs with perforated baffles / M. Kuzniatsova // Technol. – 2013. – Vol. 5, is. 4. – P. 171–174.

13 **Hurom, K.** Examining the effects of longitudinal inclined plates and perforated inlet baffle on the settling efficiency of a rectangular sedimentation tank: A computational fluid dynamics study / K. Hurom, T. Davi // Water, Air and Soil Pollution. – 2024. – Vol. 235, is. 1. – Article 73.

14 Designing baffles of fuel tanker truck to prevent rollovers / N. Ahmad, M. Varshney, M. Haani Farooqi, U. Khan // Ergonomics for Improved Productivity. – Singapore : Springer, 2021. – P. 671–678.

15 **Dasgupta, A.** Effect of Tank Cross-Section and Longitudinal Baffles on Transient Liquid Slosh in Partly-Filled Road Tankers : Master Thesis (Mechanical Engineering) / A. Dasgupta. – Montreal : Concordia University, 2011. – 100 p.

16 **Kuzniatsova, M. G.** Comparative analysis of forms of lateral baffles for road tanks / M. G. Kuzniatsova, A. O. Shimanovsky // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 797. – P. 290–298.

17 Flexitank. – Tancomed S.A. – URL: <https://tancomed.com/flexitank> (дата обращения: 01.10.2025).

18 BLT flexitank offers cost-effective, efficient, and eco-friendly liquid transport. – Qingdao BLT Flexitank Solution Co., Ltd. – URL: <https://bltflexitank.com/products/> (дата обращения: 01.10.2025).

19 **Маркавцов, А. А.** Использование контейнеров с установленными гибкими емкостями для перевозки жидких грузов / А. А. Маркавцов // МИТРО 2024 – Машиностроение. Инновации. Технологии. Робототехника : материалы докл. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – С. 136–137.

20 **Nicolici, S.** Fluid structure interaction modeling of liquid sloshing phenomena in flexible tanks / S. Nicolici, R. M. Bilegan // *Nuclear Engineering and Design*. – 2013. – Vol. 258. – P. 51–56.

21 **Hou, G.** Numerical methods for fluid-structure interaction – A review / G. Hou, J. Wang, A. Layton // *Communications in Computational Physics*. – 2012. – Vol. 12, is. 2. – P. 337–377.

22 **Иванов, В. В.** Конечно-элементное моделирование поведения резервуаров с учетом конвективной массы жидкости при сейсмических воздействиях от массовых промышленных взрывов / В. В. Иванов, А. Г. Новиньков, С. И. Протасов // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2004. – № 3. – С. 13–16.

23 Extended ALE Method for fluid-structure interaction problems with large structural displacements / S. Basting, A. Quaini, S. Čanić, R. Glowinski // *Journal of Computational Physics*. – 2017. – Vol. 331. – P. 312–336.

24 A novel smoothed particle hydrodynamics and finite element coupling scheme for fluid-structure interaction: The sliding boundary particle approach / S. L. Fuchs, C. Meier, W. A. Wall, C. J. Cyron // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2021. – Vol. 383. – Art. 113922.

25 **Yao, X.** An improved SPH-FEM coupling approach for modeling fluid-structure interaction problems / X. Yao, X. Zhang, D. Huang // *Computational Particle Mechanics*. – 2023. – Vol. 10, is. 2. – P. 313–330.

26 Variational formulation for the smooth particle hydrodynamics (SPH) simulation of fluid and solid problems / J. Bonet, S. Kulasegaram, M. X. Rodriguez-Paz, M. Profit // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2004. – Vol. 193, is. 12–14. – P. 1245–1256.

A. A. *MARKAVTSOV*<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>*Design and Technical Center of the Belarusian Railway, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## **APPROACHES TO ANALYZING THE DYNAMICS OF TRANSPORT SYSTEMS FOR LIQUID CARGO IN RIGID AND FLEXIBLE CONTAINERS**

The approaches used to analyze the dynamics of liquids transported in rigid structures (railway and road tankers, tank containers) and flexible containers (flexitanks) are considered. The feasibility of using numerical methods to model the "liquid – soft shell – rigid container" system is substantiated.

**Keywords:** liquid cargo dynamics, flexitank, liquid oscillations, numerical modeling, container strength.

Получено 31.10.2025