

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В СЕДЕЛЬНО-СЦЕПНОМ УСТРОЙСТВЕ ЛЕСОВОЗНОГО ТЯГАЧА С ПОЛУПРИЦЕПОМ

доктор технических наук, профессор **В.И. Посметьев**

доктор технических наук, профессор **М.В. Драпалюк**

кандидат технических наук, доцент **В.О. Никонов**

кандидат физико-математических наук, доцент **В.В. Посметьев**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Обоснована необходимость повышения эффективности функционирования седельно-сцепного устройства лесовозного тягача с полуприцепом. Выполнен анализ работ зарубежных ученых, исследующих влияние седельно-сцепных устройств на эффективность функционирования автопоездов. Описана важность периодического нанесения рекомендованного производителем смазочного материала на трущиеся поверхности опорной плиты и седла седельно-сцепного устройства лесовозного тягача с полуприцепом. Сформулирована цель работы, заключающаяся в определении оптимального числа выходных отверстий в седле для подачи минимального количества смазочного материала, обеспечивающего полное покрытие поверхности седла, а также длительное удержание на нем. Для достижения данной цели разработаны математическая модель и на ее основе компьютерная программа. Приведены схемы представления в модели монтажной плиты седла лесовозного тягача и опорной плиты полуприцепа, интерфейсная форма с результатами моделирования подачи и распределения смазочного материала по трущимся поверхностям седельно-сцепного устройства, а также схема основных входных и выходных параметров имитационной модели. Получены зависимости от времени коэффициента покрытия смазочным материалом монтажной плиты седла седельно-сцепного устройства при разной периодичности подачи смазочного материала через изменяемое количество выходных отверстий. Выявлено, что увеличение с течением времени коэффициента покрытия монтажной плиты седла седельно-сцепного устройства смазочным материалом происходит по экспоненциальному закону. Оптимальное количество выходных отверстий для подачи смазочного материала составляет 5-7.

Ключевые слова: лесовозный тягач, полуприцеп, система смазки, седельно-сцепное устройство, эффективность, опорная плита, компьютерная программа, математическое моделирование, подача смазочного материала, компьютерный эксперимент

RESULTS OF PROCESS SIMULATION OF FEEDING AND DISTRIBUTING LUBRICANT IN THE FIFTH-WHEEL COUPLING OF HAULING TRACTOR WITH SADDLE TRAILER

DSc (Engineering), Professor **V.I. Posmetyev**

DSc (Engineering), Professor **M.V. Drapalyuk**

PhD (Engineering), Associate Professor **V.O. Nikonov**

PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor **V.V. Posmetyev**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

The necessity of increasing the efficiency of the fifth wheel coupling of hauling tractor with saddle trailer has been substantiated. The analysis of the works of foreign scientists investigating the influence of fifth wheel couplings on the efficiency of functioning of road trains has been carried out. The importance of periodically applying the lubricant recommended by the manufacturer to the rubbing surfaces of the base plate and the saddle of the fifth wheel coupling of hauling tractor has been described. The goal of the work is formulated to determine the optimal number of outlets in the seat for supplying the minimum amount of lubricant that ensures full coverage of the seat surface, as well as long-term retention on it. To achieve this goal, a mathematical model and a computer program based on it have been developed. The schemes of representation in the model of the mounting plate of the hauling tractor and the base plate of the saddle trailer, the interface form with the results of modeling the supply and distribution of lubricant over the rubbing surfaces of the fifth wheel coupling, as well as a diagram of the main input and output parameters of the simulation model are given. The time dependences of the coefficient of lubricant coverage of the mounting plate of the fifth wheel coupling seat with different periodicity of lubricant supply through a variable number of outlet openings are obtained. It was found that the increase in the coefficient of coverage of the mounting plate of the fifth wheel coupling with a lubricant over time occurs according to an exponential law. The optimum number of openings for the lubricant supply is 5-7.

Keywords: hauling tractor, saddle trailer, lubrication system, fifth wheel coupling, efficiency, base plate, computer program, mathematical modeling, lubricant supply, computer experiment

Введение

Территория России располагает примерно 25 % мировых запасов древесины. На протяжении многих лет она является одним из главных экспортеров лесоматериалов. Научно обоснованная технология заготовки и вывозки круглых лесоматериалов для различных природно-климатических условий России позволяет снизить себестоимость конечного продукта за счет сокращения уровня транспортных издержек. Удельный вес вывозки лесоматериалов автомобильным транспортом в лесозаготовительном производстве постоянно возрастает. В настоящее время этот вид транспорта является основным видом сухопутного транспорта, которым ежегодно вывозится порядка 85 % лесоматериалов.

На выбор оптимальной компоновки лесовозного автопоезда оказывает влияние большое количество факторов, среди которых наиболее значимыми являются: законодательные ограничения по грузоподъемности и габаритам транспортных средств, параметры перевозимых лесоматериалов, климатические условия, а также качества лесовозных дорог (ЛД).

Наиболее приемлемым вариантом компоновки лесовозного автопоезда для лесозаготовительных предприятий, обладающим более низкой себестоимостью, совмещающим в себе функции сортиментовоза и роспуска, является лесовозный тягач с полуприцепом (ЛТ с ПП). Он обеспечивает более выгодное распределение веса между колесами лесовозного автопоезда, комфортные и безопасные условия для водителей, высокую

управляемость, маневренность и устойчивость на ЛД, значительную экономию топлива и универсальность применения.

Одним из основных узлов ЛТ с ПП, влияющих на безопасность дорожного движения и эффективность ЛТ с ПП при вывозке лесоматериалов, является седельно-сцепное устройство (ССУ). За последние годы опубликовано значительное количество научных работ, направленных на исследование эффективности предлагаемых конструкторских разработок в области ССУ.

С. Kim и др. (2016) в своей статье рассмотрели условия работы ССУ, возможные воспринимаемые этим устройством нагрузки, а также вопрос нерационального завышения массы ССУ, оказывающего влияние на расход топлива транспортного средства. Были рассмотрены возможные концептуальные схемы компоновки ССУ, выполнена на основе метода конечных элементов структурная оптимизация размеров ССУ, позволившая спроектировать новую более легкую по массе конструкцию устройства. Выполненные испытания ССУ на усталостную долговечность подтвердили прочность конструкции устройства при всех циклах нагружения [1].

Р. Pidl (2016) в своей статье исследует влияние на безопасность дорожного движения тягача с ПП воздействия от нагрузок в виде вибраций, передаваемых через ССУ на перевозимый груз в процессе движения автопоезда по недостаточно обустроенным дорогам. Также рассмотрено влияние износа и дефектов шкворня ССУ на возникновение нежелательных колебаний, воспринимаемых автопоездом. На основе компьютерного моделирования исследованы влияния загрузки ПП и ровности дорожного покрытия на величины возникающих вибраций, воздействующих на транспортное средство [2].

Miralbes R. и др. (2013) выполнили с целью оптимизации конструктивных параметров автопоезда по показателям прочности и жесткости имитационное моделирование функционирования основных узлов ПП при движении автопоезда в сложных дорожных условиях с изменяемой нагрузкой. Исследованы разработанные три упрощенные численные модели функционирования ССУ, учитываю-

щие вращение устройства в трех плоскостях, наличие смазочного материала между трущимися поверхностями, контакт седла со шкворнем, а также позволяющие оценивать прочность и жесткость основных элементов устройства по величине их деформации. Выявлено, что третья разработанная упрощенная модель является более точной, менее затратной, а также обеспечивает высокую сходимость с результатами натурных экспериментов [3].

В работе R. Nigam (2018) с целью исследования влияния ССУ на устойчивость, управляемость и маневренность автопоезда в различных условиях движения, разработана математическая модель данного объекта, учитывающая процессы трения в элементах ССУ. Разработанная модель позволяет задавать параметры в процессе исследования, связанные с нагрузкой на ССУ, его конструкцией, а также процессом смазки трущихся поверхностей. Выявлено, что во фрикционном взаимодействии опорной плиты ПП и седла присутствуют сухое трение и вязкие управляющие компоненты, характеристики качения автопоезда во многом зависят от конструкции ССУ, максимальное уменьшение амплитуды угла сочленения (до 24 %) наблюдается при сухом трении между опорной плитой ПП и седлом устройства [4].

В результате выполненного исследования G. Sureshkumar и L. A. Kumaraswamidhas (2020) на основе математического моделирования по оптимизации конструктивных и рабочих параметров автопоезда, оказывающих влияние на комфортные условия движения, выявлено, что значительное улучшение этих условий достигается при определении оптимального расположения точки сцепки в процессе соединения тягача с ПП ССУ, смещение шкворня при движении автопоезда создает волнообразную нагрузку и качающийся момент между центральной и задними осями, приводящий к складыванию автопоезда. Также установлено, что смещение шкворня снижает опасную величину ускорения автопоезда и обеспечивает повышение комфортабельности в процессе движения автопоезда при кратчайшем расстоянии между точкой сцепки ССУ и осью заднего моста с учетом предельно возможного значения этого смещения [5].

В.В. Shoffner (2008) в своей работе разработал три конечно-элементные модели ССУ. При сравнении полученных результатов на основании моделей и экспериментальных данных установлено, что нагрузки, воспринимаемые шкворнем и элементами ССУ, совпадают. Это позволило автору предложить три модели воспринимаемых ударных нагрузок шкворнем при движении автопоезда в различных дорожных условиях. Выявлено, что замедление автопоезда линейно увеличивается с повышением величины удара ССУ, а масса ПП напрямую влияет на силу удара в ССУ и на замедление автопоезда. Кроме этого, предложено демпфирующее устройство для ССУ, позволяющее уменьшить величину удара шкворня, а также замедление автопоезда [6].

Анализ работ зарубежных исследователей позволил выявить, что на эффективность функционирования ССУ оказывает влияние множество факторов, среди которых необходимо выделить такие, как правильная установка на ЛТ с ПП, техническое состояние подвески ПП, правильность размещения и закрепления лесоматериалов, отклонение в соосности колес ПП, допуск несоответствующих по массе и высоте ЛТ с ПП, а также процесс смазки трущихся поверхностей.

В процессе эксплуатации ЛТ с ПП по недостаточному обустроенным ЛД ССУ испытывает повышенные нагрузки, приводящие к значительному износу седла и опорной плиты ПП, которые зависят от наличия люфта в шарнирах и при превышении допустимых значений приводят в том числе и к заклиниванию в замке цапфы, отрыву опорной площадки с цапфой от ЛТ. Несмотря на то что максимальный период эксплуатации ССУ составляет порядка 10 лет, без строгого выполнения рекомендаций по его техническому обслуживанию данный ресурс будет значительно ниже, чем предусмотрено производителем.

Одной из важных операций, выполняемых в процессе технического обслуживания после расцепки ЛТ с ПП для обеспечения длительного срока службы ССУ, является периодическое нанесение рекомендованного производителем смазочного материала на трущиеся поверхности опорных плит седла и ПП.

Большая часть производителей в настоящее время устанавливает для подачи смазочного материала к трущимся поверхностям ССУ через предусмотренные в конструкции седла подводящие каналы, централизованные системы смазки. Меньшая же часть производителей предусматривает смазку трущихся поверхностей ССУ при помощи установки на поверхность седла специальных антифрикционных накладок, а также при помощи традиционного способа нанесения смазочного материала шприцеванием через каждые 25 тыс. км для эксплуатирующегося ЛТ с ПП в сложных природно-климатических и дорожных условиях [7, 8].

Точное дозирование при подаче смазочного материала к трущимся поверхностям ССУ позволяет не только продлить срок службы узла, но и снизить перерасход смазочного материала, а следовательно, сократить затраты на техническое обслуживание, что в конечном счете отразится на стоимости вывозимого лесоматериала. В связи с этим основной целью данной работы является определение оптимального числа выходных отверстий в седле для подачи минимального количества смазочного материала, обеспечивающего полное покрытие рабочей поверхности седла, а также длительную сохранность этого смазочного материала на нем [9, 10].

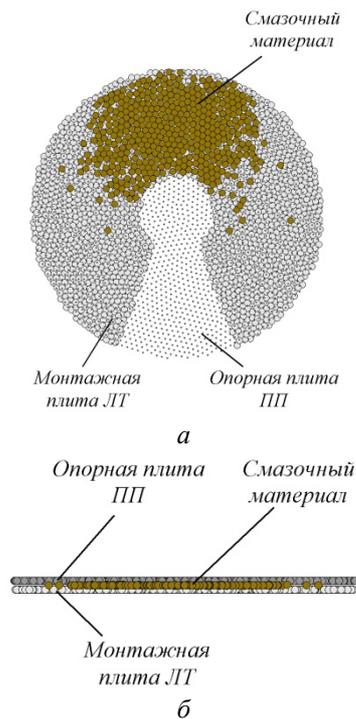
Материалы и методы

Для теоретического исследования процесса подачи и распределения смазочного материала в ССУ ЛТ с ПП в статье разработаны математическая модель и на ее основе компьютерная программа. Они позволяют определить оптимальные значения параметров, характеризующих эффективность системы смазки ССУ путем изменения входных переменных, включающих в себя характеристики используемого смазочного материала, конструктивные параметры ССУ, а также показатели, характеризующие условия движения ЛТ с ПП.

Распределение смазочного материала между контактирующими между собой плитами ССУ ЛТ с ПП является достаточно сложным для моделирования процессом. Модель должна обладать приемлемой физической адекватностью, высокими пространственным и временным разрешениями, а также требует для полной реализации использования

существующих возможностей современных высокопроизводительных компьютеров.

В пределах разработанной имитационной модели с использованием метода динамики частиц при конечно-элементном приближении смазочный материал и поверхности монтажной и опорной плит ССУ ЛТ с ПП представляются совокупностью большого количества (порядка 5000 ... 10000) отдельных шарообразных элементов. Элементы, ограниченные одинаковым диаметром 5 мм, механически взаимодействуют между собой (рис. 1).



a, б – проекции ССУ в плоскостях XY и XZ

Рис. 1. Представление в модели ССУ со смазочным материалом как совокупности множества шарообразных элементов (собственные разработки)

Для моделирования распределения смазочного материала необходимо в модели представить верхнюю поверхность монтажной плиты ССУ ЛТ (рис. 2, *a*) и нижнюю поверхность опорной плиты ПП (рис. 2, *б*). Представление плит в виде совокупности шаров позволяет имитировать шероховатость поверхности. Для наглядности далее на иллюстрациях плиты накладываются друг на друга (размещаются соосно) и для того, чтобы было видно монтажную плиту сквозь

опорную, шарообразные элементы изображаются меньшим диаметром (рис. 2, *в*). Тогда можно увидеть совмещение плит (рис. 1, *a*).

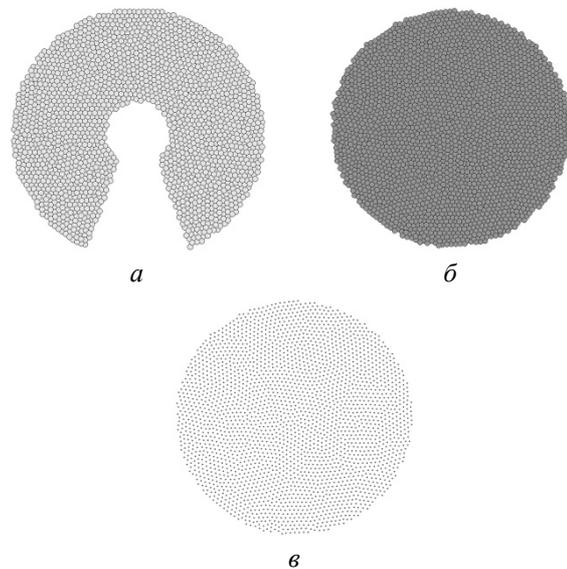


Рис. 2. Представление в модели монтажной плиты ЛТ (*a*) и опорной плиты ПП с реальным диаметром элементов (*б*) и с уменьшенным диаметром элементов для видимости монтажной плиты сквозь опорную (*в*) (собственные разработки)

Взаимодействие элементов поверхности опорной плиты с элементами поверхности монтажной плиты способствует появлению между ними упругих сил и сил вязкого трения (рис. 3). В данной работе учитывается взаимодействие элементов смазочного материала друг с другом и с элементами плит, но не учитывается взаимодействие элементов плит между собой: плиты считаются двумя едиными связными телами, движущимися друг рядом с другом с небольшим зазором, в котором находится смазочный материал (рис. 1, *б*).

В математической модели с учетом сил отталкивания и притяжения между элементами рассчитывается с использованием законов классической динамики процесс движения этих элементов. В разрабатываемой математической модели требуется описать процесс распределения смазочного материала в ССУ ЛТ с ПП, а также расчета таких его показателей, как равномерность, дальность распределения и количество оставшегося на поверхностях монтажной и опорной плит ССУ смазочного материала. Математическое моделирование данного процесса осуществляет-

ся в трехмерном пространстве XYZ . Состояние отдельного элемента E_i из множества имитирующих взаимодействие между поверхностями плит описывается в математической модели тремя декартовыми координатами его центра (x_i, y_i, z_i) и тремя составляющими его скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) . Упруго-вязкое описание в математической модели контактов между элементами, дает возможность задать в ней следующие механические свойства: поверхностное натяжение смазочного материала, коэффициент вязкого трения, а также модуль упругости. Математическая модель также учитывает силы отталкивания и притяжения между соседними элементами, имитирующими взаимодействие между поверхностями плит при их внедрении друг в друга (рис. 3, а) или отделении друг от друга (рис. 3, б) [11, 12].

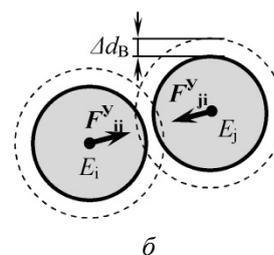
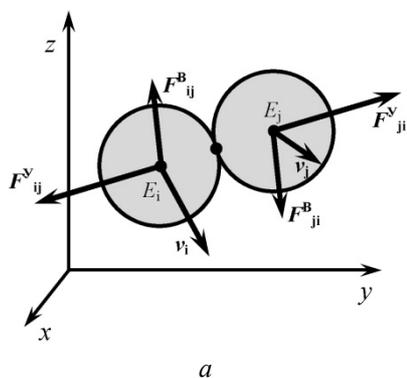


Рис. 3. Силы отталкивания (а) и притяжения (б), возникающие между элементами, имитирующими взаимодействие между поверхностями плит ССУ ЛТ с ПП (собственные разработки)

Упругая составляющая контакта между элементами, имитирующими смазочный материал, поверхности монтажной и опорной плит, позволяет контактирующим элементам отталкиваться друг от друга на расстояние не более диаметра одного элемента $r_{ij} < d_{\text{э}}$, а также притягиваться друг к другу на критическое расстояние r_k .

Уравнение взаимодействия и движения элементов, имитирующих взаимодействие между поверхностями плит ССУ ЛТ с ПП, описывается с учетом второго закона Ньютона следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{э}}} \left\{ \begin{array}{l} c_{ij} (d_{\text{э}} - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + k_{ij} (r_{ij} - d_{\text{э}}) (v_{xi} - v_{xj}), \quad r_{ij} < k_{Oij} d_{\text{э}}; \\ 0, \quad r_{ij} \geq k_{Oij} d_{\text{э}}; \end{array} \right. \\ \\ m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{э}}} \left\{ \begin{array}{l} c_{ij} (d_{\text{э}} - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + k_{ij} (r_{ij} - d_{\text{э}}) (v_{yi} - v_{yj}), \quad r_{ij} < k_{Oij} d_{\text{э}}; \\ 0, \quad r_{ij} \geq k_{Oij} d_{\text{э}}; \end{array} \right. \\ \\ m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = -m_i g + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{э}}} \left\{ \begin{array}{l} c_{ij} (d_{\text{э}} - r_{ij}) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + k_{ij} (r_{ij} - d_{\text{э}}) (v_{zi} - v_{zj}), \quad r_{ij} < k_{Oij} d_{\text{э}}; \\ 0, \quad r_{ij} \geq k_{Oij} d_{\text{э}}; \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

где i – порядковый номер элемента; m_i – масса i -го элемента; $x_i, y_i, z_i, v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}$ – декартовы координаты и составляющие скорости; t и g – время и ускорение свободного падения; N_{Σ} – общее количество элементов; j – порядковый номер элемента, взаимодействующий с i -м элементом; c_{ij} – коэффициент жесткости контакта элементов i и j друг с другом; k_{ij} – коэффициент вязкого трения между элементами i и j ; r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j .

Расстояние r_{ij} между центрами элементов определяется по следующей зависимости:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}. \quad (2)$$

Функции $x_i(t), y_i(t), z_i(t)$, являющиеся решением приведенной системы дифференциальных уравнений, дают возможность определить направление движения элементов смазочного материала в трехмерном пространстве, а также оценить эффективность исследуемого процесса подачи и распределения смазочного материала в ССУ ЛТ с ПП. Данная математическая модель не относится к аналитическим, она является алгоритмической, так как расчет выходных показателей в этой модели осуществляется в соответствии с алгоритмом по входным характеристикам за счет пространственной и временной дискретизации. Это обосновывается сложностью обеспечения такой математической моделью адекватной точности в расчетах. Расчет приведенных выше формул включает в себя три отдельных цикла по номерам компьютерного эксперимента, временного шага и элемента [13, 14].

В процессе проведения компьютерного эксперимента элементы, имитирующие смазочный материал, перемещаются внутри прямоугольного параллелепипеда с геометрическими параметрами $L_X \times L_Y \times L_Z$. В случае, когда элементы касаются закрытых стенок модельного прямоугольного параллелепипеда, осуществляется проверка на соответствие следующим условиям: $x_i < 0, y_i < 0, y_i > L_Y, z_i < 0, z_i > L_Z$. Если условия выполняются, то такие элементы за счет зеркального отражения от контакта с закрытой стенкой возвращаются обратно в прямоугольный параллелепипед.

В математической модели применяется следующий перечень параметров смазочного материала: $m_i, d_{\Sigma}, c_{ij}, k$. Определение массы одного элемента m_i смазочного материала выполняется на осно-

вании табличных данных о плотности используемого смазочного материала, а также по геометрическим соображениям согласно выражению

$$m_i = \rho \cdot V_{\Sigma} = \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d_{\Sigma}}{2} \right)^3 \cdot k_{\phi} = \frac{\pi}{6} \rho d_{\Sigma}^3 k_{\phi}, \quad (3)$$

где ρ – плотность, кг/м³; V_{Σ} – объем элемента, м³; k_{ϕ} – коэффициент формы (принят равным 1,4).

Для определения коэффициента жесткости контакта между двумя элементами смазочного материала применяются табличные данные значений модуля упругости E и геометрические дискретные характеристики:

$$c_{II} = E \cdot \frac{\pi d}{4} k_{\phi}. \quad (4)$$

Для представления в модели характерной геометрической конфигурации монтажной плиты ЛТ сначала производится подготовка одного слоя плотноупакованных шарообразных элементов в квадратной форме $0,5 \times 0,5$ м. Для подготовки слоя элементов проводится отдельный расчет – численное интегрирование уравнений движения элементов стали в течение 1 секунды модельного времени, за которое элементы формируют плотноупакованный слой с ближним порядком, но с отсутствием дальнего порядка. Затем из плотноупакованного слоя вырезается окружность диаметром 0,5 м, и из нее удаляется соосная с ней внутренняя окружность диаметром 0,1 м. После этого делается вырез сектором со смещенным центром окружности.

Аналогичным образом в модели готовится опорная плита ПП, которая представляется слоем плотноупакованных элементов в форме окружности. Элементы плит намеренно расположены друг к другу плотнее, чем равновесное положение, для того чтобы элементы смазочного материала не проникали сквозь слои, представляющие плиты.

Монтажная и опорная плиты в модели располагаются параллельно и соосно друг с другом на заданном расстоянии, образуя просвет, обратно пропорциональный вертикальной нагрузке на ССУ.

Монтажная плита неподвижна, в то время как опорная плита совершает вращательное движение вокруг вертикальной оси, общей для двух плит. Угол поворота $\varphi_{оп}$ изменяется по закону

$$\varphi_{on}(t) = \varphi_{on}^m \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right), \quad (5)$$

где φ_{on}^m – максимальный угол поворота опорной плиты ССУ; T – период периодического поворотного движения опорной плиты ССУ.

Движение элементов смазочного материала описывается дифференциальными уравнениями второго порядка

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = k_1 \frac{dx}{dt} + k_2x + k_3, \quad \text{или} \quad (6)$$

$$ma = k_1v + k_2x + k_3, \quad (7)$$

где m – масса одного элемента; t – время; k_1, k_2, k_3 – величины, не зависящие от искомой функции x , но зависящие от других искомых функций системы дифференциальных уравнений; a и v – ускорение и скорость элемента [15, 16].

Решение данных уравнений осуществляется методом Эйлера-Коши с использованием следующих зависимостей:

$$x^{\tau+1} = x^{\tau} + v^{\tau} \cdot \Delta t + \frac{k_1v^{\tau} + k_2x^{\tau} + k_3}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \quad (8)$$

$$v^{\tau+1} = v^{\tau} + \frac{k_1v^{\tau} + k_2x^{\tau} + k_3}{m} \cdot \Delta t. \quad (9)$$

При описании в математической модели с помощью основной системы дифференциальных уравнений взаимодействия и движения элементов смазочного материала требуется задать следующие начальные условия, определяемые алгоритмом их периодического появления: четкое расположение элементов в трехмерном пространстве, а также декартовы составляющие скорости в начальный момент времени. Основными допущениями, принятыми в разработанной математической модели, являются: шарообразная форма элементов смазочного материала; движение этих элементов по законам классической механики; постоянная плотность сплошной среды в рамках одного элемента; линейный упруго-вязкий характер механического контакта элементов друг с другом.

В качестве показателей эффективности процесса подачи и распределения смазочного материала, рассчитываемых по результатам моделирования, предлагается использовать две характеристики. Первой является коэффициент покрытия площади монтажной плиты k_n . Коэффициент представляет собой отношение площади S_n , покрытой сма-

зочным материалом достаточной толщины, к общей площади монтажной плиты S_0

$$k_n = \frac{S_n}{S_0}. \quad (10)$$

В рамках дискретизации среды шарообразными элементами коэффициент покрытия рассчитывается следующим образом:

$$k_n = \frac{N_n}{N_{pm}}, \quad (11)$$

где N_n – количество элементов смазочного материала, находящихся на монтажной плите; N_{pm} – максимальное количество элементов смазочного материала, которые могут в равновесном состоянии находиться на монтажной плите [17-20].

Вторым показателем эффективности является время $t_{0,9}$, за которое коэффициент покрытия монтажной плиты уменьшается от 1,0 до 0,9 за счет выдавливания смазочного материала вне ССУ при периодическом вращательном движении опорной плиты относительно монтажной:

$$t_{0,9} = t|_{k_n=0,9} - t|_{k_n=1,0}. \quad (12)$$

Для исследования в разработанной математической модели процесса подачи и распределения смазочного материала в ССУ ЛТ с ПП, а также для определения оптимального количества, частоты его подачи, координат расположения источников разработана компьютерная программа, позволяющая моделировать распространение смазочного материала, поступающего из заданных источников, между монтажной и опорной плитами ССУ.

Функциональными возможностями разработанной компьютерной программы являются: выполнение имитации процесса подачи и распределения смазочного материала между плитами ССУ; задание параметров ССУ, источников смазочного материала, характера движения ЛТ с ПП; вывод на экран в процессе моделирования двух проекций плит ССУ со смазочным материалом, а также текущих значений показателей эффективности (рис. 4).

Кроме этого, компьютерная программа применима для моделирования большинства основных типов ССУ ЛТ с ПП, различного характера движения ПП относительно ЛТ, а также поиска на основе компьютерных экспериментов оптимального расположения точек и частоты подачи смазочного материала.

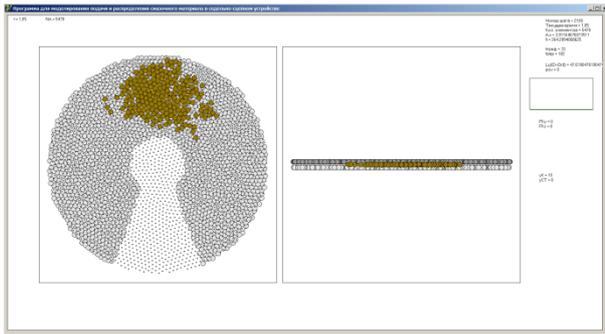


Рис. 4. Интерфейсная форма с результатами моделирования подачи и распределения смазочного материала в ССУ (собственные разработки)

Разработанная модель обладает высокой универсальностью и учитывает множество геометрических параметров ССУ, физических параметров смазочного материала, закономерностей его подачи, а также характера движения ЛТ с ПП. Основные входные и выходные переменные модели показаны на схеме (рис. 5).

К первой группе входных переменных относятся параметры смазочного материала: Q – расход смазочного материала; Δt – интервал между подачами смазочного материала; $N_{\text{во}}$ – количество выходных отверстий на монтажной плите; ν – вязкость смазочного материала. Вторая группа входных переменных модели представляет собой геометрические параметры ССУ: D_m – диаметр монтажной плиты в приближении круглой формы; D_v – диаметр отверстия под шкворень в центре плиты; $\Delta\varphi_c$ – угол сектора выреза из монтажной плиты. Третья группа входных переменных задает характер перемещения опорной плиты ПП относительно монтажной плиты ЛТ: $\varphi_{\text{оп}}^m$ – максимальный угол отклонения ПП от ЛТ в боковом направлении; T – период отклонения ПП от ЛТ в боковом направлении в синусоидальном приближении. Эффективность системы смазки ССУ оценивается двумя показателями: $k_{\text{п}}$ – коэффициент покрытия монтажной плиты ССУ смазочным материалом; $t_{0,9}$ – время, за которое площадь слоя смазочного материала уменьшается на 10 % по сравнению с площадью непосредственно после подачи смазочного материала.

Дальнейшее теоретическое исследование заключается в поиске таких диапазонов входных переменных, при которых показатели эффективности $k_{\text{п}}$ и $t_{0,9}$ будут максимальными.

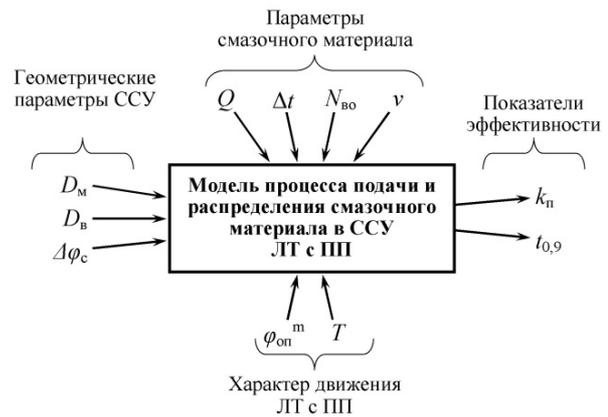


Рис. 5. Входные параметры и выходные показатели математической модели (собственные разработки)

Результаты и обсуждение

Для всестороннего исследования процесса подачи и распределения смазочного материала в ССУ проводили множество компьютерных экспериментов, объединенных в серии.

Основным компьютерным экспериментом был так называемый «базовый» компьютерный эксперимент с наиболее типичными параметрами смазочного материала, его расхода, а также геометрических характеристик ССУ. При исследовании влияния каждого параметра изменяли поочередно данный параметр по отношению к базовому значению при сохранении остальных параметров на базовом уровне (так называемый «звездообразный» план эксперимента). Это позволило установить влияние каждого отдельного параметра.

В базовом компьютерном эксперименте в начальный момент времени отсутствовал смазочный материал между плитами ССУ (рис. 6, а). С течением модельного времени элементы смазочного материала подавались из одного выходного отверстия с постоянным расходом. При этом опорная плита ПП совершала периодическое вращательное движение относительно неподвижной плиты ЛТ с периодом $T = 1$ мин. Поступающий смазочный материал распределялся тонким слоем между плитами ССУ (рис. 6, б). Однако постепенно увеличивались потери смазочного материала из-за выхода элементов за пределы монтажной плиты (рис. 6, в ... е). Поэтому с течением времени устанавливалось динамическое равновесие между подачей и потерей смазочного материала. При этом

смазочный материал формировал область площадью около 0,45 площади всей монтажной плиты.

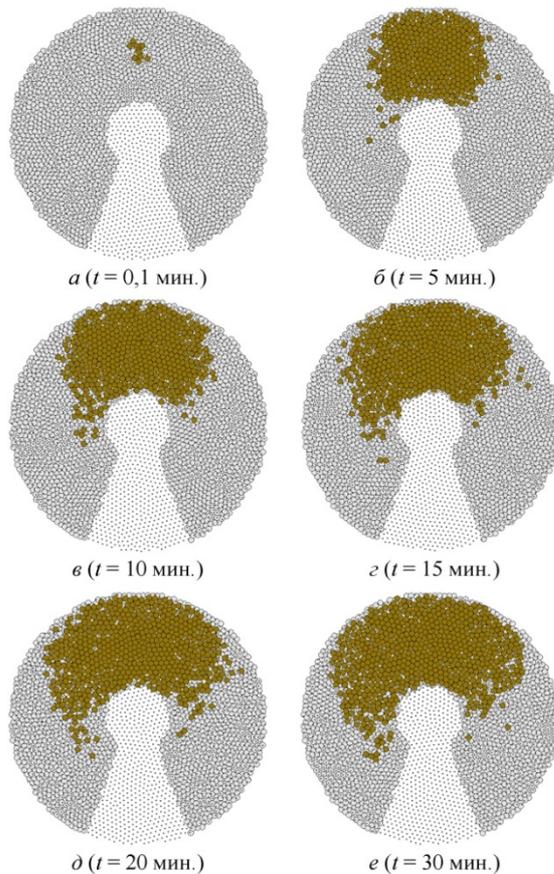


Рис. 6. Постепенное распределение поступающего смазочного материала по мере периодического вращения плит ССУ ЛТ с ПП относительно друг друга. В начальный момент времени смазочный материал отсутствует (собственные разработки)

Зависимость коэффициента покрытия ССУ смазочным материалом близка к экспоненциальной с некоторым искажением (рис. 7). В случае одного выходного отверстия максимальный коэффициент покрытия составляет 0,45 и достигается через 40 минут после начала подачи смазочного материала (рис. 7, а). В случае же пяти выходных отверстий, расположенных равномерно по кругу монтажной плиты, и в случае того же расхода смазочного материала через каждое отверстие максимальный коэффициент покрытия 0,97 достигается через 7 минут после начала подачи смазочного материала.

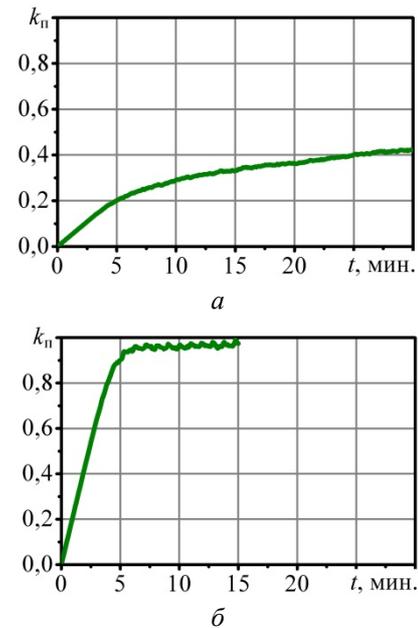


Рис. 7. Зависимость от времени коэффициента покрытия смазочным материалом монтажной плиты ССУ для одного выходного отверстия (а) и пяти выходных отверстий (б) с одинаковым расходом смазочного материала через одно отверстие (собственные разработки)

Модель обладает высокой универсальностью и позволяет охватывать различные масштабы времени, от секунд до суток и месяцев, и позволяет воспроизводить различные алгоритмы подачи смазочного материала. Приведенный выше пример соответствует медленной подаче смазочного материала в течение десятков минут. Дополнительно проведен компьютерный эксперимент с периодической ежесуточной подачей смазочного материала: медленной подачей на протяжении нескольких часов для возобновления необходимого уровня смазочного материала. В этом случае зависимости от времени коэффициента покрытия представляет собой пилообразную кривую (рис. 8), которая также увеличивается экспоненциально из-за отсутствия смазочного материала в начальный момент времени.

Для изучения влияния количества выходных отверстий $N_{во}$ смазочного материала в монтажной плите на эффективность распределения смазочного материала проведена серия компьютерных экспериментов, в которой увеличивали $N_{во}$ от 1 до 6 с шагом 1.

В случае малого количества выходных отверстий (1 или 2) в состоянии динамического равновесия (расход смазочного материала равен утечке) охватываемая смазкой область не покрывает всю монтажную плиту ССУ (рис. 9, а, б).

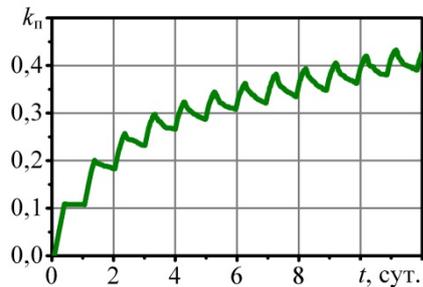


Рис. 8. Зависимость от времени коэффициента покрытия смазочным материалом монтажной плиты ССУ при ежесуточной подаче небольшого количества смазочного материала в одно отверстие (собственные разработки)

При количестве выходных отверстий 3 или 4 к моменту времени 15 минут от начала подачи смазочного материала монтажная плита оказывается покрыта смазочным материалом практически полностью (рис. 9, в, г). Дальнейшее увеличение количества нецелесообразно, так как практически не приводит к увеличению коэффициента покрытия монтажной плиты ССУ, но способствует потере смазочного материала (рис. 9, д).

Достаточность четырех выходных отверстий подтверждается графиком зависимости коэффициента покрытия от количества отверстий: к $N_{во} = 4$ график практически выходит на насыщение и коэффициент покрытия превышает 0,95 (рис. 10, а).

С увеличением количества отверстий незначительно увеличивается время сохранения смазочного материала (рис. 10, б). С позиций увеличения времени сохранения смазочного материала целесообразно увеличивать количество отверстий, по-видимому, до 7-8, о чем свидетельствует выход графика на насыщение к данному диапазону.

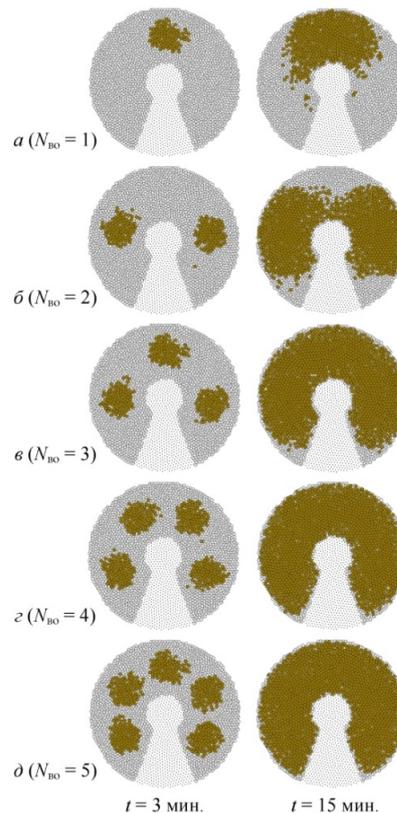


Рис. 9. Влияние количества выходных отверстий $N_{во}$ на характер покрытия монтажной плиты ЛТ смазочным материалом через 3 и 15 минут после начала поступления смазочного материала (собственные разработки)

Таким образом, оптимальное количество выходных отверстий для смазочного материала составляет 5 ... 7. Это позволяет обеспечить полное покрытие монтажной плиты ССУ и обеспечить более длительную сохранность смазочного материала (ориентировочно 20-23 ч на уменьшение его содержания на 10 %).

Выводы

Выполнен анализ работ зарубежных исследователей, который показал, что эффективность функционирования ССУ зависит от его массогабаритных параметров, прочности и жесткости конструкции, месторасположения на тягаче, технического состояния подвески ПП, правильного размещения и закрепления груза на ПП, отклонения в соосности колес ПП, несоответствия допуска по высоте и массе тягача с ПП, а также от процесса смазки трущихся поверхностей ССУ.

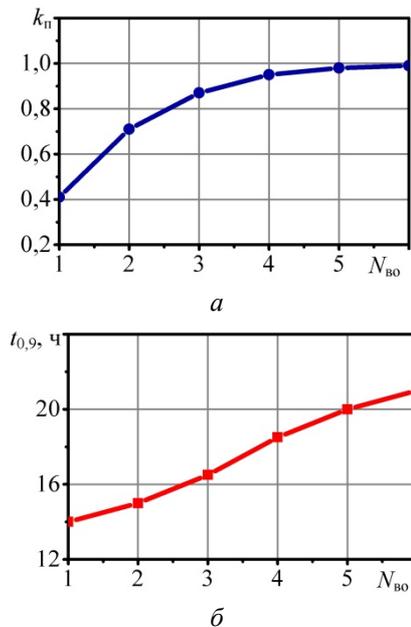


Рис. 10. Влияние количества выходных отверстий $N_{во}$ на коэффициент покрытия монтажной плиты ССУ k_n (а) и время снижения на 10 % содержания смазочного материала после прекращения подачи $t_{0,9}$ (б) (собственные разработки)

Разработана математическая модель процесса подачи и распределения смазочного материала в ССУ ЛТ с ПП, позволяющая изучить процесс движения смазочного материала между монтажной плитой ЛТ и опорной плитой ПП. Разработана ком-

пьютерная программа, позволяющая изменять в процессе компьютерного эксперимента подачу и распределение смазочного материала в ССУ ЛТ с ПП с целью определения оптимального количества, координат расположения источников и частоты подачи смазочного материала.

Увеличение с течением времени коэффициента покрытия монтажной плиты ССУ смазочным материалом происходит по экспоненциальному закону, так как величина утечек смазочного материала стремится к величине его подачи. Поэтому целесообразно использовать периодическую подачу смазочного материала, включая подачу по условию уменьшения содержания смазочного материала на 10 %.

Одно выходное отверстие для смазочного материала позволяет охватить 0,45 площади монтажной плиты за время около 30 минут с момента начала подачи смазочного материала.

Оптимальное количество выходных отверстий для смазочного материала составляет 5-7. Это позволяет обеспечить полное покрытие монтажной плиты ССУ и достичь более рационального использования смазочного материала в исследуемой паре трения (ориентировочно 20-23 ч и уменьшение содержания смазочного материала на 10 %).

Библиографический список

1. Kim C. New weight-reduction design of the fifth wheel coupler with a trailer by using topology optimization and durability tests / C. Kim, S.-Y. Lee, Y.-C. Lee // Transactions of KSAE. – 2016. – Vol. 24. – № 2. – P. 137–143. – *Bibliogr.: pp. 143 (5 titles)*. – DOI 10.7467/KSAE.2016.24.2.137.
2. Pidl, R. Analytical approach to determine vertical dynamics of a semi-trailer truck from the point of view of goods protection / R. Pidl // AIP Conference Proceedings 1922, 120003 (2018). – *Bibliogr.: pp. 120003-15 (20 titles)*. – DOI 10.1063/1.5019118.
3. Miralbes, R. Simulation of suspension, torsion bars, and fifth wheel for semitrailers using finite elements / R. Miralbes, J. Abad, D. Valladares // Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering. – Vol. 2013. – Article ID 548760. – 14 p. – *Bibliogr.: pp. 13-14 (17 titles)*. – DOI 10.1155/2013/548760.
4. Nigam, R. Characteristics of fifth wheel and its influence on handling and maneuvering of articulated heavy vehicles / R. Nigam ; Master thesis, Department of Mechanics and Maritime Sciences Chalmers university of technology Gothenburg, Sweden 2018. – 89 p. – *Bibliogr.: pp. 63-65 (36 titles)*.
5. Sureshkumar, G. Optimization of structural parameters through objective-evaluation of ride comfort in a heavy duty commercial vehicle / G. Sureshkumar, L. A. Kumaraswamidhas // G. LA, Cogent Engineering. – 2020. – Vol. 7 : 1743408. – 17 p. – *Bibliogr.: pp. 16-17 (45 titles)*. – DOI 10.1080/23311916.2020.1743408.

6. Shoffner B. W. Development and validation of a finite element analysis model used to analyze coupling reactions between a tractor is fifth wheel and a semitrailer is kingpin / B. W. Shoffner ; A Thesis in Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University, 2008. – 92 p. – *Библиогр.*: pp. 79-80 (13 titles).

7. Анализ конструктивных особенностей систем смазки, используемых в седельно-сцепных устройствах лесовозных тягачей с полуприцепами / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. В. Авдюхин, О. С. Лесных // Воронежский научно-технический вестник. – 2020. – Т. 1. – № 1 (31). – С. 22–39. – *Библиогр.*: с. 38–39 (28 назв.).

8. Посметьев, В. И. Перспективная конструкция поршневого насоса с электромагнитным приводом для автоматической централизованной системы смазки лесовозного автомобиля / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Энергоэффективность автотранспортных средств: нанотехнологии, информационно-коммуникационные системы, альтернативные источники энергии : Матер. всерос. науч.-техн. конференции с междунар. участием 14-17 мая, 2019, г. Воронеж. – Воронеж, 2019. – С. 312–318. – *Библиогр.*: с. 318 (10 назв.).

9. Елисеев, Е. В. Системы смазки Lincoln на автомобилях КамАЗ / Е. В. Елисеев, В. А. Обухов // Строительные и дорожные машины. – 2009. – № 11. – С. 1–3.

10. Антропов, Б. С. Эффективность применения автоматических централизованных систем смазки на автомобильном транспорте / Б. С. Антропов, Д. В. Лебедев // Вестник АПК Верхневолжья. – 2015. – № 4 (32). – С. 90–93. – *Библиогр.*: с. 93 (4 назв.).

11. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учебник для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 2001. – 343 с. – *Библиогр.*: с. 340–341. – ISBN 5-06-003860-2.

12. Хеерман, Д. В. Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике : пер. с англ. / под ред. С. А. Ахманова. – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 175 с. – *Библиогр.*: с. 162–168. – ISBN 5-02-014347-2.

13. Гулд, Х. Компьютерное моделирование в физике : в 2 ч. Ч. 2 / Х. Гулд, Я. Тобочник ; пер. с англ.: А. Н. Полюдов, В. А. Панченко. – Москва : Мир, 1990. – 400 с. – *Библиогр.*: в конце глав. – ISBN 5-03-001594-9.

14. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ. Кн. 2 / Н. Дрейпер, Г. Смит ; пер. с англ.: Ю. П. Адлер, В. Г. Горский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Финансы и статистика, 1987. – 351 с. – *Библиогр.*: с. 316–343.

15. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Д. Иствуд ; пер. с англ.: А. С. Липатов, А. Н. Полюдов ; ред.: Р. З. Сагдеев, В. И. Шевченко. – Москва : Мир, 1987. – 638 с. – *Библиогр.*: с. 610–628.

16. Григорьев, Ю. Н. Численное моделирование методами частиц в ячейках / Ю. Н. Григорьев, В. А. Вшивков, М. П. Федорук. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. – 360 с. – *Библиогр.*: с. 347–360. – ISBN 5-7692-0555-5.

17. Зализняк, В. Е. Основы вычислительной физики. Ч. 2. Введение в методы частиц / В. Е. Зализняк. – Москва, Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2019. – 156 с. – *Библиогр.*: с. 154–155. – ISBN 5-93972-481-7.

18. Сергеев, В. В. Алгоритмы локализации точки в трехмерном пространстве для генерации объекта при моделировании методом частиц / В. В. Сергеев, С. Ю. Коростелев, С. Г. Пасхье // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 5. – С. 44–47. – *Библиогр.*: с. 47 (9 назв.).

19. Суравкин, А. Ю. Реализация метода SPH на CUDA для моделирования несжимаемых жидкостей / А. Ю. Суравкин // Наука и образование. – 2012. – № 7. – С. 87–106. – *Библиогр.*: с. 103–104 (13 назв.). – DOI: 10.7463/0712.0423582.

20. Герасимов, А. В. Разработка алгоритма расчета условий на свободной и контактной границах при моделировании деформирования материалов методом SPH / А. В. Герасимов, Р. О. Черепанов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – № 7/2. – С. 64–69. – *Библиогр.*: с. 69 (7 назв.).

References

1. Kim C., Lee S.-Y., Lee Y.-C. (2016) New weight-reduction design of the fifth wheel coupler with a trailer by using topology optimization and durability tests. *Transactions of KSAE*, Vol. 24, № 2, pp. 137-143. DOI: 10.7467/KSAE.2016.24.2.137.
2. Pidl R. Analytical approach to determine vertical dynamics of a semi-trailer truck from the point of view of goods protection. Cite as : AIP Conference Proceedings 1922, 120003 (2018). DOI: 10.1063/1.5019118.
3. Miralbes R., Abad J., Valladares D. Simulation of suspension, torsion bars, and fifth wheel for semitrailers using finite elements. Hindawi Publishing Corporation *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2013, Article ID 548760, 14 p. DOI: 10.1155/2013/548760.
4. Nigam R. Characteristics of fifth wheel and its influence on handling and maneuvering of articulated heavy vehicles. Master thesis, Department of Mechanics and Maritime Sciences Chalmers university of technology Gothenburg, Sweden 2018. 89 p.
5. Sureshkumar G., Kumaraswamidhas L. A. (2020) Optimization of structural parameters through objective-evaluation of ride comfort in a heavy duty commercial vehicle. *G. LA, Cogent Engineering*, 7: 1743408. 17 p. DOI: 10.1080/23311916.2020.1743408.
6. Shoffner B. W. Development and validation of a finite element analysis model used to analyze coupling reactions between a tractor is fifth wheel and a semitrailer is kingpin. A Thesis in Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University, 2008. 92 p.
7. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Avdyuhin A. V., Lesnih O. S. (2020) *Analiz konstruktivnih osobennostei sistem smazki, ispolzuemih v sedelno-scepnih ustroistvah lesovoznih tyagachei s polupricepami* [Analysis of the design features of lubrication systems used in fifth-wheel couplings of timber tractors with semitrailers]. *Voronezhskii nauchno-tekhnicheskii vestnik* [Voronezh Scientific and Technical Bulletin]. Vol. 1, № 1 (31), pp. 22-39 (in Russian).
8. Posmetev V. I., Nikonov V. O. *Perspektivnaya konstrukciya porshneвого nasosa s elektromagnitnim privodom dlya avtomaticheskoi centralizovannoi sistemi smazki lesovoznogo avtomobilya* [Advanced Design Electromagnetic Piston Pump for Automatic Centralized Timber Truck Lubrication System]. *Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation May 14-17, 2019, Voronezh*, pp. 312-318 (in Russian).
9. Eliseev E. V., Obuhov V. A. (2009) *Sistemy smazki Lincoln na avtomobilyah KamAZ* [Lincoln lubrication systems on vehicles]. *Stroitelnie i dorojnie mashini* [Construction and road machines], № 11, pp. 1-3 (in Russian).
10. Antropov B. S., Lebedev D. V. (2015) *Effektivnost primeneniya avtomaticheskikh centralizovannykh sistem smazki na avtomobilnom transporte* [The effectiveness of the use of automatic centralized lubrication systems in road transport]. *Vestnik APK Verhnevoljya* [Agroindustrial complex of the Upper Volga region], № 4 (32), pp. 90-93 (in Russian).
11. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. *Modelirovanie sistem* [System modeling]. 3rd ed., rev. and add. Moscow : Higher. shk., 2001, 343 p. (in Russian).
12. Heerman D. V. *Metodi kompyuternogo eksperimenta v teoreticheskoi fizike* [Computer Experiment Methods in Theoretical Physics] : transl. from English ; ed. S. A. Akhmanova. Moscow: Science. Ch. ed. physical-mat. lit., 1990, 175 p. (in Russian).
13. Guld H., Tobochnik Ya. *Kompyuternoe modelirovanie v fizike* [Computer simulation in physics] : Part 2 ; transl. from English by A.N. Polyudov, V.A. Panchenko. Moscow: Mir, 1990, 400 p. (in Russian).
14. Dreiper N., Smit G. *Prikladnoi regressionnoi analiz. Kn. 2* [Applied regression analysis: translated edition. Book 2] ; transl. from English by Yu.P. Adler, V.G. Gorsky. 2nd ed., rev. and add. Moscow: Finance and statistics, 1987, 351 p. (in Russian).
15. Hokni R., Istvud D. *Chislennoe modelirovanie metodom chastic* [Particle Numerical Simulation: Translated Edition] ; transl. from English by A.S. Lipatov, A.N. Polyudov ; ed.: R.Z. Sagdeev, V.I. Shevchenko. Moscow: Mir, 1987, 638 p. (in Russian).

16. Grigorev Yu. N., Vshivkov V. A., Fedoruk M. P. *Chislennoe modelirovanie metodami chastic v yacheikah* [Numerical simulation by particle-in-cell methods]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2004, 360 p. (in Russian).
17. Zaliznyak V. E. *Osnovi vichislitelnoi fiziki. Ch.2. Vvedenie v metodi chastic* [Fundamentals of Computational Physics. Part 2. Introduction to particle methods]. Moscow, Izhevsk: Regular and chaotic dynamics, Institute for Computer Research, 2019, 156 p. (in Russian).
18. Sergeev V. V., Korostelev S. Yu., Pashe S. G. (2008) *Algoritmi lokalizacii tochki v trehmernom prostranstve dlya generacii obekta pri modelirovanii metodom chastic* [Algorithms for localizing a point in three-dimensional space for generating an object when modeling by the particle method]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. Vol. 312, № 5, pp. 44-47 (in Russian).
19. Suravkin A. Yu. (2012) *Realizaciya metoda SPH na CUDA dlya modelirovaniya nesjimaemih jidkosti* [Implementation of the SPH method in CUDA for modeling incompressible fluids]. *Nauka i obrazovanie* [Science and education], № 7, pp. 87-106 (in Russian).
20. Gerasimov A. V., Cherepanov R. O. (2009) *Razrabotka algoritma rascheta uslovii na svobodnoi i kontaktnoi granicah pri modelirovanii deformirovaniya materialov metodom SPH* [Development of an algorithm for calculating the conditions at the free and contact boundaries when modeling the deformation of materials by the SPH method]. *Izvestiya visshih uchebnykh zavedenii. Fizika* [Proceedings of higher educational institutions. Physics], № 7/2, pp. 64-69 (in Russian).

Сведения об авторах

Посметьев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: posmetyev@mail.ru.

Драпалюк Михаил Валентинович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Никонов Вадим Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: victorvpo@mail.ru.

Information about authors

Posmetyev Valery Ivanovich – DSc (Engineering), Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Cars, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: posmetyev@mail.ru.

Drapalyuk Mikhail Valentinovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Nikonov Vadim Olegovich – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Cars, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Posmetyev Viktor Valeryevich – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: victorvpo@mail.ru.