Pushkino, Russian Federation; e-mail: prokazin@vniilm.ru

Lobanova Elena Nikitichna - head of the laboratory of seed, cultivation of planting material and non-timber forest products, the FBI "all-Russian research Institute for silviculture and mechanization of forestry", PhD in Agricultural, Senior Researcher, Pushkino, Russian Federation, e-mail: lobanova@vniilm.ru

Kazakov Igor Vladimirovich – leading researcher of the Department of mechanization of forest works and standardization, FBI «All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry», PhD in Engineering, Senior Researcher, Pushkino, Russian Federation; e-mail: Igor.kazakov2015@bk.ru

DOI: 12737/21695
УДК 630*377.44

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ ДВИЖИТЕЛЕЙ ГУСЕНИЧНЫХ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН ЛЗ-4 И ЛЗ-5 НА КОЛЕЕОБРАЗОВАНИЕ

кандидат технических наук, доцент **Е. Е. Клубничкин**[1]
кандидат технических наук, доцент **В. Е. Клубничкин**[1]
доктор технических наук, профессор **О. А. Наказной**[2]
доктор технических наук, профессор **В. Н. Наумов**[2]
доктор технических наук, профессор **Г. О. Котиев**[2]
доктор технических наук, профессор **В. В. Беляков**[3]
кандидат технических наук, доцент **Д. В. Зезюлин**[3]
1 – ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса», г. Мытищи, Российская Федерация
2 – ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана», г. Москва, Российская Федерация
3 – ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 1547

Номенклатура типов и образцов лесозаготовительных машин (ЛЗМ) обширна, она включает транспортные, валочно-пакетирующие машины и погрузчики, различные инженерные и технологические машины и т. д. Требования оптимального развития предполагают комплексное создание разнотипных ЛЗМ в составе семейства, объединяющих на единой конструктивно-технической базе образцы одной категории по массе. При проектировании новых образцов лесопромышленных гусеничных машин или их модернизации возникает необходимость оценить некоторые показатели их проходимости с учетом изменения во времени эксплуатационных показателей машин. В статье было уделено внимание влиянию распределения нормальных давлений движителей на колееобразование гусеничных лесозаготовительных машин одного семейства модели ЛЗ-4 и ЛЗ-5. Описываются основные процессы, влияющие на конструкцию лесозаготовительных машин при их работе. В статье дан анализ результатов исследования колееобразования машин ЛЗ-4 и ЛЗ-5, который показал, что для улучшения опорно-временных показателей проходимости гусеничной лесозаготовительной машины необходимо смещать центр давления вперед или располагать его в средней части длины опорной поверхности гусениц, а также находить конструктивные решения по снижению пиковых и средних нормальных давлений гусениц на лесной грунт. В статье предложена методика расчета статических нагрузок, действующих на элементы ходовой системы гусеничной лесозаготовительной машины. Приведена методика расчета статических давлений опорных катков и гусениц ненагруженной и загруженной лесозаготовительной машины на грунт (поверхность пути). Предложен способ расчета и построения эпюры удельных давлений лесозаготовительной машины на грунт, учитывающий приложенные к ней активные силы и положение центра статического давления.

Ключевые слова: гусеничный движитель; лесопромышленная гусеничная машина; движение; ходовая система; нагрузка на грунт.

THE INFLUENCE OF THE DISTRIBUTION OF NORMAL MOVERS` PRESSURES OF TRACKED FOREST MACHINE ЛЗ-4 AND ЛЗ-5 ON THE RUTTING

Ph.D. in Engineering, Associate Professor **E. E. Klubnichkin**[1]
Ph.D. in Engineering, Associate Professor **V. E. Klubnichkin**[1]
DSc in Engineering, Professor **O. A. Nakaznoi**[2]
DSc in Engineering, Professor **V. N. Naumov**[2]
DSc in Engineering, Professor **G. O. Kotiev**[2]
DSc in Engineering, Professor **V. V. Belyakov**[2]
Ph.D. in Engineering, Associate Professor **D. V. Zezyulin**[3]
1 – Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Moscow State Forest University», Mytishi, Russian Federation
2 – Federal State Budget Education Institution of Higher Professional Education « Bauman Moscow State Technical University » Moscow, Russian Federation
3 – Federal State Budget Education Institution of Higher Professiona Education « Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev», Nizhny Novgorod, Russian Federation

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation project number 1547

Abstract

The range of types and designs of forest machines (LZM) is extensive. It includes transportation, felling and milling machines, loaders, and various engineering and technological machines, etc. Optimal development requirements involve the creation of different types of forest machines in one family, bringing together the samples of the same weight category on a single design-technical base. When designing new models of timber caterpillar tracked vehicles or their modernization it is necessary to evaluate some indices of their passability taking into account the time changes of machines` operational performance. The article pays attention to the influence of the distribution of normal movers` pressures on the rutting of caterpillar tracked forest machines of the same family model ЛЗ-4 and ЛЗ-5. It describes the basic processes that affect the design of forest machines at their work. The article analyzes the results of the study on rutting of machines ЛЗ-4 and ЛЗ-5 which showed that to improve the supporting-time passability indices of caterpillar tracked forest machine it is necessary to shift the pressure center forward or place it in the middle of the length of the bearing caterpillar tracked surface, and find constructive solutions to reduce the peak and average normal caterpillar tracked pressures on the forest ground. In the article the method of calculation of static loads on the elements of running system tracked forest machine. The methodology of calculation of static pressure rollers and tracks unloaded and loaded logging machines on the ground (road surface). The method of calculation and construction of diagrams of specific pressures harvesting machine on the ground, taking into account attached to it active force and the position of the center of the static pressure.

Keywords: caterpillar track mover; timber caterpillar tracked vehicle; movement; running gear system; load on the ground.

От проектирования до создания опытных или модернизированных образцов лесопромышленных гусеничных машин и на их базе агрегатных лесосечных машин возникает необходимость оценить некоторые их показатели проходимости с учетом изменения во времени эксплуатационных показателей машин [2, 3, 8]. Это возможно осуществить путем математического моделирования процесса взаимодействия движителя лесозаготовительной гусеничной машины (ЛГМ) с лесным грунтом в вертикальной плоскости. Для осуществления математического моделирования натурный процесс воздействия гусениц ЛГМ на грунт заменяется силовым воздействием «движущейся» эпюрой нормальных давлений (НД) ЛГМ на грунтовую массу [6].

Исследованию распределения давлений гусеничных машин различного функционального назначения на опорное основание посвящено большое ко-

личество работ как российских, так и зарубежных ученых [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]. В данных работах показаны способы повышения подвижности гусеничных машин с помощью выбора рациональных геометрических параметров ходовой части и положения центра масс машины, а также снижения пиковых давлений опорной поверхности гусеничных движителей путем повышения их обратной жесткости. Однако по своим конструкционным особенностям ЛГМ представляют собой особый класс машин с точки зрения исследования процессов взаимодействия гусеничных тяговых систем с местностью (учитывая профильные и опорные характеристики) и оценки влияния распределения нормальных давлений движителей на колееобразование [8, 24, 25, 26].

Для получения достоверных расчетных результатов возникает необходимость качественной и количественной оценки процесса нагружения лесного грунта реальной «движущейся» эпюрой НД движителя ЛГМ и определения закона, связывающего изменение НД по базе ЛГМ и деформации лесного грунта за период взаимодействия *t* [9]. А как известно, закон изменения «движущейся» эпюры НД в значительной степени зависит от положения центра давления, координаты которого характеризуются распределением нормальных реакций лесного грунта по опорно-активным участкам (ОАУ) гусениц [1, 5, 7]. Проведенные экспериментальные исследования на машинах ЛЗ-4 и ЛЗ-5 позволили получить некоторые результаты по влиянию вида и значения реальных эпюр НД, продольной координаты центра давлений на осадку гусениц ЛГМ в лесной грунт.

На рис. 1 представлен образец осциллографической записи реальных эпюр НД на опорно-активных участках движителя машины ЛЗ-4 в движении. Вид и форма «движущихся» эпюр НД под движителями машин ЛЗ-4 и ЛЗ-5 на данном лесном грунте (γ=1,40-1,68 т/м^3, W= 18,2-22,5 %, число ударов n= 1-4) легко аппроксимируются двумя прямыми, образующими стороны равнобедренного треугольника с основанием, равным длине ОАУ гусеницы катка [4]. Проведенная статистическая обработка результатов исследований по длине ОАУ у движителей ЛЗ-4 и ЛЗ-5 на данном лесном грунте позволила определить ее среднюю величину, равную $b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = b_5 = b_6 = 0{,}49$ м.

При изменении режимов работы ЛГМ центр давления будет изменять продольную координату, т. е. изменится распределение НД «движущейся» эпюры ЛГМ, следовательно, возникает необходимость учета развесовки массы машины и положения центра давлений в статике. Экспериментальные исследования определили статическую продольную координату центра давлений исследуемых машин, значение которой было тождественно величине продольной координаты центра тяжести, приведенной в технической характеристике по машинам. Также определено существенное различие по величине НД под 2 катком движителя машин (рис. 2).

Оценим влияние величины полезной нагрузки на кониках фактором на распределение НД по базе движителя, смещение центра давления и осадку гусениц в лесной грунт при постоянной скорости движения ЛГМ.

При движении машин ЛЗ-4 и ЛЗ-5 со скоростью 0,95-0,99 м/с с массой полезной нагрузки 0 кг, 3000 кг и 8000 кг получены экспериментальные значения НД под ОАУ гусениц, по которым построены «движущиеся» эпюры НД движителя (рис. 3, *а).* Следует отметить, что данные эпюры НД отражают изменение средних значений НД по ОАУ гусениц машин ЛЗ-4 и ЛЗ-5.

В холостом режиме движения центр давлений у машины ЛЗ-4 сместился вперёд на 0,05 м (рис. 3, *д*), в результате статическая эпюра НД (рис. 2, *в*) изменила форму, произошло догружение трех средних катков движителя с сохранением средних величин НД под 1 и 6 катками (рис. 3, *а),* общее среднее НД составляло 73,4 кПа.

На большую величину (до 0,251 м) в данном случае было смещение центра давлений машины ЛЗ-5 с сохранением статического вида эпюры НД (рис. 3, а и 2, б). Средняя величина НД под 2 катком ЛЗ-5 не изменилась, а под остальными катками средние НД увеличились. Общее среднее НД по ОАУ гусениц движителя ЛЗ-5 составляло 94,2 кПа.

Аппроксимируя реальные «движущиеся» эпюры [5, 6, 10] НД по ОАУ движителя машин ЛЗ-4 и ЛЗ-5 в холостом режиме движения одной прямой с сохранением продольных координат центра давлений и общей величины средних НД, получили виды «движущихся» гипотетических эпюр средних НД,

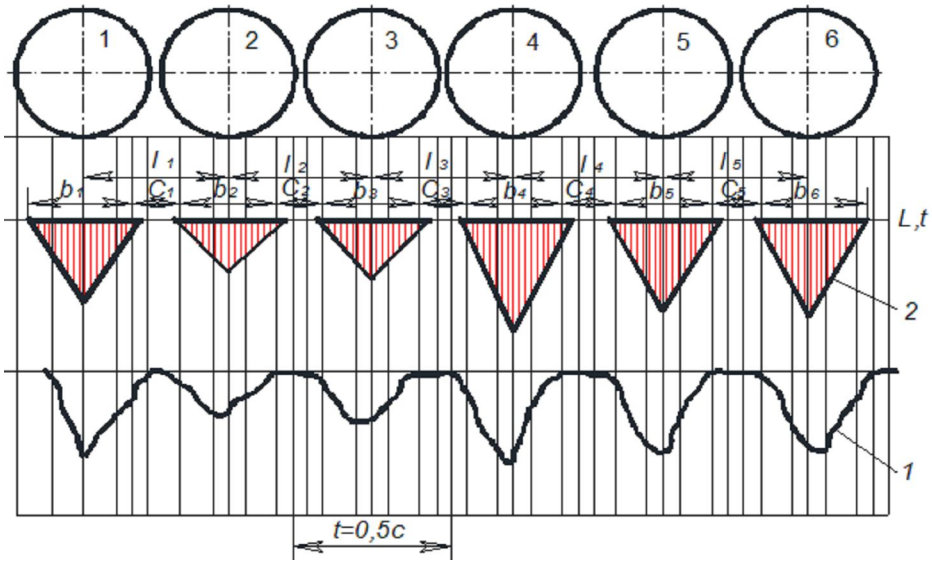

Рис. 1. Образец осциллографической записи реальных эпюр НД под движителем машины ЛЗ-4: 1 – реальная эпюра НД машины; 2 – аппроксимированная «движущаяся» эпюра НД машины

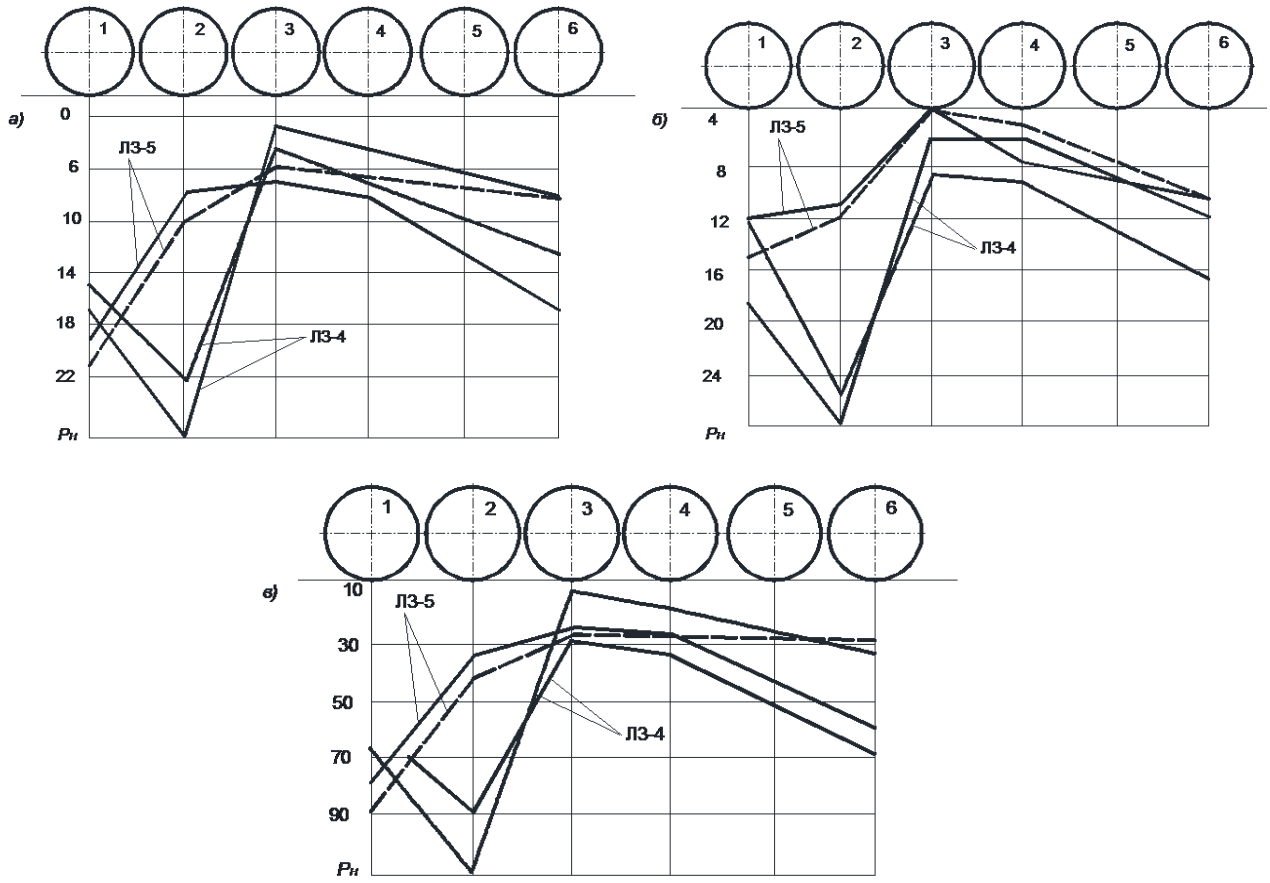

Рис. 2. Распределение опорных реакций лесозаготовительных машин ЛЗ-4 и ЛЗ-5 в статике без нагрузки: - - - левый борт машины; — правый борт машины; *а* – при снятых гусеницах; *б* – с гусеницами; *в* – расчетные эпюры нормальных давлений по ОАУ движителя машин (длина ОАУ b = 0,48 м)

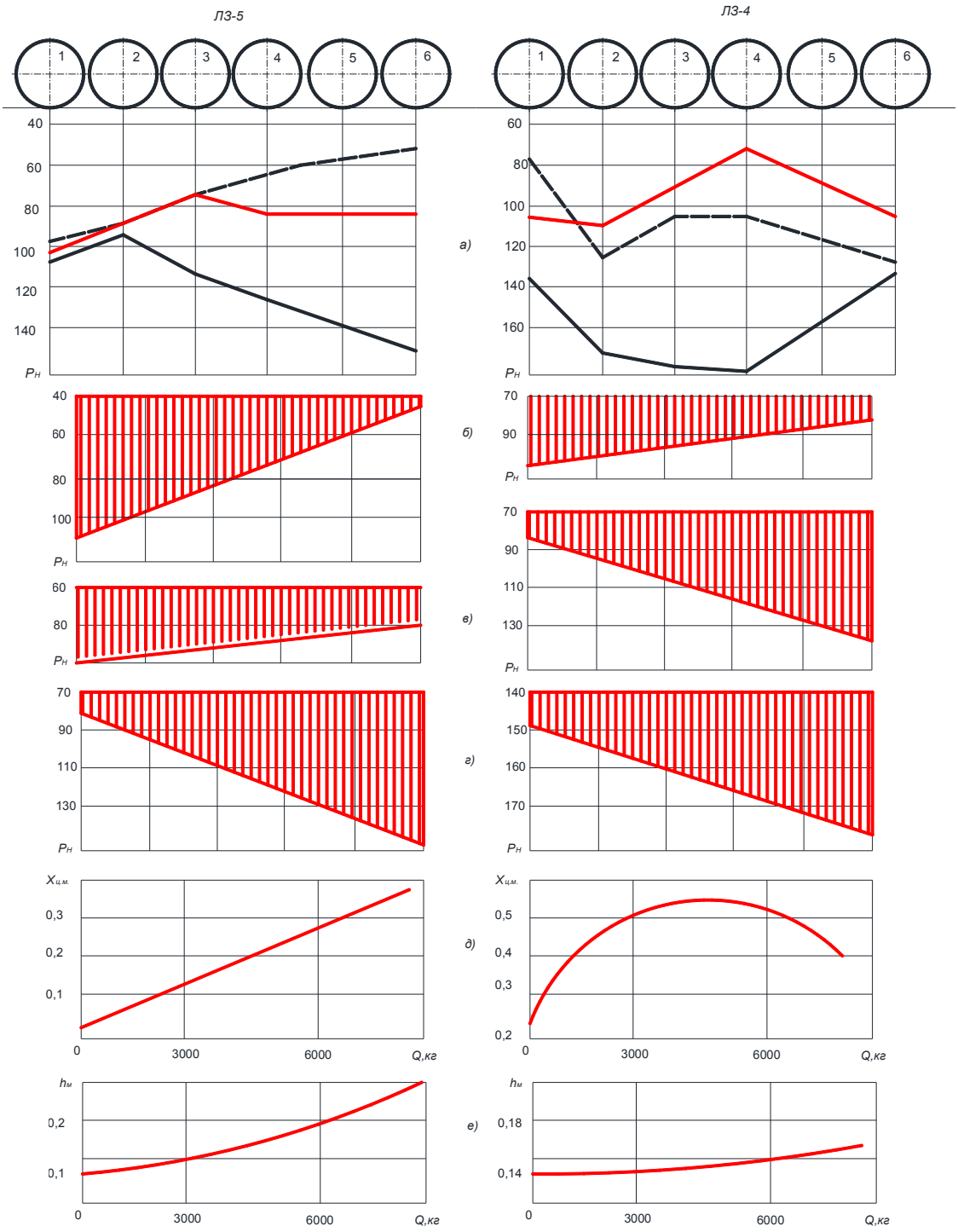

Рис. 3. Распределение средних НД под катками гусеничного движителя машин ЛЗ-4 и ЛЗ-5, изменение продольной координаты центра давлений и осадки гусениц с учетом полезной нагрузки на кониках погрузочной площадки при средней скорости движения v = 0,99 м/с: а – реальные эпюры средних НД Q = 3000 кг; Q = 8000 кг; б – аппроксимированная «движущаяся» эпюра средних НД при Q=0; в – аппроксимированная «движущаяся» эпюра средних НД при Q=3000 кг; г – аппроксимированная «движущаяся» эпюра средних НД при Q=8000 кг; д – изменение продольной координаты центра давлений от полезной нагрузки; е – изменение величин осадки гусениц в лесной грунт с учетом полезной нагрузки

представленных на рис. 3, *б*. С учетом графиков рис. 3, *б* и 3, *е* увеличенную осадку гусениц машины ЛЗ-5 можно объяснить более высокими значениями средних НД под 4 и 5 катками, т. е. при одном виде «движущихся» эпюр средних НД осадка гусениц будет меньше в том случае, если данная эпюра НД имеет наименьшую продольную координату центра давлений от оси переднего катка и наименьшее значение средних НД.

При нагружении машин грузом массой 3000 кг «движущаяся» эпюра средних НД машины ЛЗ-5 приняла вид с задним расположением центра давления ($x_{цм}$= 2,02 м) с перепадом средних НД 52,78 кПа, а у машины ЛЗ-4 сохранился прежний вид «движущейся» эпюры средних НД с перепадом значений НД 17 кПа (рис. 3*, а, в).*

Необходимо отметить, что аппроксимированная эпюра средних НД машины ЛЗ-5 (рис. 3, *в*) явно имеет отличие как по форме, так и по значениям НД от эпюры (рис. 3*, а*). Следовательно, в данном случае аппроксимация реальной «движущейся» эпюры средних НД одной прямой нежелательна, так как в конечном результате величина осадки гусениц в лесной грунт не будет соответствовать действительности.

Наиболее существенное изменение «движущейся» эпюры НД машины ЛЗ-5 при аппроксимации происходит при нагружении движущейся машины массой 12000 кг (рис. 3, *а, г*). Реальная «движущаяся» эпюра средних НД из трапециевидной формы переходит в вид усеченного прямоугольника с задним расположением центра давлений *(*$x_{цм}$= 2,118 м), а как известно [2, 9], результат взаимодействия приведенных видов эпюр НД движителей с грунтом различен по осадке гусениц.

В третьем случае догружения машины ЛЗ-4 реальная «движущаяся» эпюра средних НД (рис. 3, *а*) полностью отождествляется аппроксимированной «движущейся» эпюрой средних НД (рис. 3, *г*).

Анализ результатов по исследованию машины ЛЗ-4 показывает, что с увеличением массы груза на кониковой площадке машины центр давлений смещается назад с 2,3 м до 2,1 м, при этом треугольного вида эпюра средних НД имеет переход с переднего расположения центра давлений на заднее со значительным перепадом величины НД. В итоге при одном проходе это оказывает влияние на высокий темп колееобразования по сравнению с машиной ЛЗ-5 (рис. 3, *е*).

Проведенные экспериментальные исследования по характеру распределения средних НД и смещения центра давления у машин ЛЗ-4 и ЛЗ-5 показывают:

- при расчетных исследованиях «движущаяся» эпюра средних НД машины ЛЗ-4 с достаточной точностью аппроксимируется общей прямой линией с уклоном, определяемым расположением центра давления;

- аппроксимация реальной «движущейся» эпюры НД машины ЛЗ-5 общей прямой линией нецелесообразна;

- с увеличением нагрузки на кониковую площадку машины ЛЗ-5 треугольный вид «движущейся» эпюры НД переходит в трапециевидный, что в конечном итоге снижает темп образования осадки гусениц в лесной грунт; темп образования осадки гусениц в лесной грунт при одном проходе машины пропорционален величине смещения центра давления назад и составляет 10 %, что подтверждается результатами работы.

Вывод

Таким образом, для улучшения опорно-временных показателей проходимости ЛГМ необходимо смещать центр давления вперед или располагать его в средней части длины опорной поверхности гусениц, а также рассматривать конструктивные решения по снижению пиковых и средних НД гусениц на лесной грунт.

Библиографический список

1.Клубничкин, В. Е. Исследование кинематики и динамики движителя гусеничной лесозаготовительной машины [Текст] / В. Е. Клубничкин, Е. Е. Клубничкин, Л. Д. Бухтояров // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4. – № 4 (16). – С. 179-190.

2.Клубничкин, Е. Е. Конечно-элементное моделирование ходовой системы гусеничной лесозаготовительной машины [Текст] / Е. Е. Клубничкин // Автомобильная промышленность. – 2009. – № 2. – С. 29-30.

3. Наумов, В. Н. Тяговый расчет гусеничной машины [Текст] : учеб. пособие / В. Н. Наумов, Г. О. Котиев, К. Ю. Машков. – М., 2004.

4. Наказной, О. А. Зависимость видов колебаний многоопорной транспортной машины от ее скорости [Текст] / О. А. Наказной, А. Ю. Шмаков // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 10 (22). – С. 43.

5. Модель взаимодействия элементов опорной поверхности гусениц лесозаготовительной машины с грунтом [Текст] / В. Е. Клубничкин, Е. Е. Клубничкин, В. И. Запруднов, Л. Д. Бухтояров, Д. Ю. Дручинин, С. В. Малюков // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4. – № 4 (16). – С. 191-200.

6. Model to calculate loading of transmission elements at controlled curvilinear motion of the tracked timber harvesting machine [Text] / V. E. Klubnichkin, E. E. Klubnichkin, V. I. Zaprudnov, L. D. Bukhtoyarov, S. V. Malyukov, D. Yu. Druchinin // Лесотехнический журнал. – 2015. – Т. 5. – № 2 (18). – С. 166-176.

7. Said Al-Milli. Track–terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain [Text] / Said Al-Milli, Lakmal D. Seneviratne, Kaspar Althoefer // Journal of Terramechanics, 2010. – Vol. 47. – Issue 3, pp. 151-160.

8. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин [Текст] / В. В. Беляков, А. М. Беляев, М. Е. Бушуева, У. Ш. Вахидов, К. О. Гончаров, Д. В. Зезюлин, В. Е. Колотилин, К. Я. Лелиовский, В. С. Макаров, А. В. Папунин, А. В. Тумасов, А. В. Федоренко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3 (100). – С. 145-174.

9. Математическая модель поверхности движения лесных дорог [Текст] / А. В. Редкозубов, Д. В. Зезюлин, В. С. Макаров, В. В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 4 (106). – С. 348-352.

10. Снегоходные машины [Текст] / Л. В. Барахтанов, В. И. Ершов, С. В. Рукавишников, А. П. Куляшов. – Горький : Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.

11. Аникин, А. А. Разработка научных методов повышения проходимости по снегу особо легких гусеничных машин [Текст] : дис. … д-ра техн. наук: 05.05.03 / А. А. Аникин. – Н. Новгород, 2010. – 308 с.

12. Алипов, А. А. Повышение проходимости гусеничных машин по снегу на основе применения гусеничных цепей с повышенной обратной жесткостью [Текст] : дис. … канд. техн. наук:/ А. А. Алипов, – Н. Новгород, 2001. – 308 с.

13. Wong, J. Y. Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering [Text] / J. Y. Wong, Second Edition. Elsevier, Oxford, England, 488 pages, 2010. ISBN: 978-0-7506-8561-0.

14. Wong, J. Y. Development of high-mobility tracked vehicles for over snow operations. [Text] / J. Y. Wong // Journal of Terramechanics, 2009. – 46(4). – pp. 141-155.

15. Беккер, М. Г. Введение в теорию систем местность-машина [Текст] / пер. с англ ; под ред. В. В. Гуськова. – М. : Машиностроение, 1973. – 520 с.

16. Liu, X. Y. The research on grounding pressure distribution of tracked travelling mechanism [Text] / X. Y. Liu, Z. Y. Jiao & Zhang M. Y. – 2014. doi:10.4028

17. Li, S. L. Calculation method and testing verification of ground traction of tracked vehicle. [Text] / Li S. L., Wang H. Y., Chen B., Rui Q. & Guo J. // Paper presented at the Advances in Engineering Materials and Applied Mechanics - Proceedings of the 5th International Conference on Machinery, Materials Science and Engineering Applications, MMSE 2015, 443-448.

18. Analysis and Calculation of Tracked Vehicle Steering-Load Based on Conditions of Tracks' Slip [Text] / H. Y. Wang, T. F. Li, T. Wang, Q. Rui, J. T. Gai, G. M. Zhou, Y. Yuan. // Applied Mechanics and Materials, 2013. – Vol. 378. – pp. 55-60.

19. Modeling and Analysis of the Steering Resistance Moment in Small Tracked Robot [Text] / Y. Ou, S J. Huang, H. T. Feng, W. J. Tao // Advanced Materials Research, 2011. – Vol. 201-203. – pp. 1939-1948.

20. Research on the effect of grounding pressure distribution on traction force of tracked vehicle. [Text] / Wu H., Liu S., He J., Chen X., Gao Y. // Paper presented at the Proceedings of the International Offshore and Polar Engi-

neering Conference. – 2010. –1. – pp. 197-200.

21. Research on effects of grounding pressure distribution of a type of seabed tracked vehicle on traction force [Text] / Wu H., Chen X., Gao Y., He J., Ding L. & Xu Y. // Paper presented at the Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 2008. – pp. 73-77.

22. Gigler J. K. Design of a simulation model for the prediction of the ground pressure distribution under tracked vehicles [Text] / J. K. Gigler // Internal Report, Agricultural & Food Engineering Dept., University College, Dublin. –1992.

23. Garber, M. Prediction of ground pressure distribution under tracked vehicles [Text] / M. Garber, J. Y. Wong. // I. An analytical method for predicting ground pressure distribution. J. Terramechanics, 1981. – 18 (1). – pp. 1-23

24. Edlund, J. A forest machine bogie with a bearing capacity dependent contact area: acceleration and angular orientation when passing obstacles and drawbar pull force and free rolling resistance on firm ground [Text] / Edlund J., Bergsten U., Arvidsson H. // Silva Fennica. – 2013. – Vol. 47. – no. 3 article id 1017. http://dx.doi.org/10.14214/sf.1017

25. Soil compaction of various central European forest soils caused by traffic of forestry machines with various chassis [Text] / Allman M., Jankovský M., Messingerová V., Allmanová Z. & Ferenčík M. // Forest Systems, 2015. – 24(3) doi:10.5424/fs/2015243-07541.

References

1. Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Buhtojarov L.D. *Issledovanie kinematiki i dinamiki dvizhitelja gusenichnoj lesozagotovitel'noj mashiny* [Study kinematics and dynamics of the forest machine mover track] *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2014, Vol. 4, no. 4 (16), pp. 179-190. (In Russian)

2. Klubnichkin E.E., Klubnichkin E.E. *Konechno-jelementnoe modelirovanie hodovoj sistemy gusenichnoj lesozagotovitel'noj mashiny* [Finite element simulation of running system tracked forest machine] *Avtomobil'naja promyshlennost'.* [Automotive] 2009, no. 2, pp. 29-30. (In Russian)

3. Naumov V.N., Kotiev G.O., Mashkov K.Ju. *Tjagovyj raschet gusenichnoj mashiny* [Traction calculation tracked vehicle]. Moscow, 2004. (In Russian)

4. Nakaznoy O.A., Shmakov A.Ju. *Zavisimost' vidov kolebanij mnogoopornoj transportnoj mashiny ot ee skorosti* [The dependence of the oscillation modes multisupport transport machine of its speed] *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii.* [Engineering magazine: Science and Innovation] 2013, no. 10 (22), p. 43. (In Russian)

5. Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Zaprudnov V.I., Buhtojarov L.D., Druchinin D.Ju., Maljukov S.V. *Model' vzaimodejstvija jelementov opornoj poverhnosti gusenic lesozagotovitel'noj mashiny s gruntom* [The model of interaction of elements supporting surface forestry machine tracks with the ground]. *Lesotekhnicheskii zhurnal,* 2014, Vol. 4, no. 4 (16), pp. 191-200. (In Russian)

6. Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Zaprudnov V.I., Buhtojarov L.D., Maljukov S.V., Druchinin D.Ju. Model to calculate loading of transmission elements at controlled curvilinear motion of the tracked timber harvesting machine. *Lesotekhnicheskii zhurnal,* 2015, Vol. 5, no. 2 (18), pp. 166-176. (In Russian)

7. Said Al-Milli, Lakmal D. Seneviratne, Kaspar Althoefer Track–terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain. Journal of Terramechanics, 2010, Vol. 47, Issue 3, pp. 151-160.

8. Belyakov V.V., Belyaev A.M., Bushueva M.E., Vahidov U.Sh., Goncharov K.O., Zezjulin D.V., Kolotilin V.E., Leliovskij K.Ja., Makarov V.S., Papunin A.V., Tumasov A.V., Fedorenko A.V. *Koncepcija podvizhnosti nazemnyh transportno-tehnologicheskih mashin* [Concept of terrestrial mobility of transport and technological machines] *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva.* [Proceedings of the NSTU them. RE Alekseeva.] 2013, no. 3 (100), pp. 145-174. (In Russian)

9. Redkozubov A.V., Zezjulin D.V., Makarov V.S., Beljakov V.V. *Matematicheskaja model' poverhnosti dvizhenija lesnyh dorog* [A mathematical model of motion of the surface of forest roads] *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva.* [Proceedings of the NSTU them. RE Alekseeva.] 2014, no. 4 (106), pp. 348-352. (In Russian)

10. Barahtanov L.V., Ershov V.I., Rukavishnikov S.V., Kuljashov A.P, *Snegohodnye mashiny* [Snowmobile machines]. 1986, 191 p. (In Russian)

11. Anikin A.A. *Razrabotka nauchnyh metodov povyshenija prohodimosti po snegu osobo legkih gusenichnyh mashin*. Dis. dokt. teh. nauk: [Development of scientific methods to increase permeability in the snow especially light tracked vehicles. Dis. DSc in Engineering]. 2010, 308 p. (In Russian)

12. Alipov A.A. *Povyshenie prohodimosti gusenichnyh mashin po snegu na osnove primenenija gusenichnyh cepej s povyshennoj obratnoj zhestkost'ju*. Dis. kand. teh. Nauk [Rough terrain tracked vehicles for snow through the use of track circuits with high rigidity feedback Dis. DSc in Engineering]. 2001, 308 p. (In Russian)

13. Wong, J.Y. Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering, Second Edition. Elsevier, Oxford, England, 2010. 488 p., ISBN: 978-0-7506-8561-0.

14. Wong, J.Y., Development of high-mobility tracked vehicles for over snow operations. Journal of Terramechanics, 2009. 46(4): pp. 141-155.

15. Bekker M.G. *Vvedenie v teoriju sistem mestnost'-mashina*: [Introduction to systems theory-terrain vehicle:]. Moscow, 1973, 520 p.

16. Liu, X. Y., Jiao, Z. Y., & Zhang, M. Y. (2014). The research on grounding pressure distribution of tracked travelling mechanism doi:10.4028

17. Li, S. L., Wang, H. Y., Chen, B., Rui, Q., & Guo, J. Calculation method and testing verification of ground traction of tracked vehicle. Paper presented at the Advances in Engineering Materials and Applied Mechanics - Proceedings of the 5th International Conference on Machinery, Materials Science and Engineering Applications, MMSE 2015, pp. 443-448.

18. Wang H.Y., Li T.F., Wang T., Rui Q., Gai J.T., Zhou G.M., Yuan Y., "Analysis and Calculation of Tracked Vehicle Steering-Load Based on Conditions of Tracks' Slip", Applied Mechanics and Materials, 2013, Vol. 378, pp. 55-60.

19. Ou Y., Huang S.J., Feng H.T., Tao W.J., "Modeling and Analysis of the Steering Resistance Moment in Small Tracked Robot", Advanced Materials Research, 2011, Vol. 201-203, pp. 1939-1948,

20. Wu, H., Liu, S., He, J., Chen, X., & Gao, Y. (2010). Research on the effect of grounding pressure distribution on traction force of tracked vehicle. Paper presented at the Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 1 197-200.

21. Wu, H., Chen, X., Gao, Y., He, J., Ding, L., & Xu, Y. (2008). Research on effects of grounding pressure distribution of a type of seabed tracked vehicle on traction force. Paper presented at the Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 73-77.

22. Gigler J.K. Design of a simulation model for the prediction of the ground pressure distribution under tracked vehicles. Internal Report, Agricultural & Food Engineering Dept., University College, Dublin,1992.

23. M. Garber, J.Y. Wong. Prediction of ground pressure distribution under tracked vehicles I. An analytical method for predicting ground pressure distribution. J. Terramechanics, 18 (1) (1981), pp. 1-23

24. Edlund J., Bergsten U., Arvidsson H. (2013). A forest machine bogie with a bearing capacity dependent contact area: acceleration and angular orientation when passing obstacles and drawbar pull force and free rolling resistance on firm ground. Silva Fennica, Vol. 47, no. 3 article id 1017. http://dx.doi.org/10.14214/sf.1017

25. Allman M., Jankovský, M., Messingerová, V., Allmanová, Z., & Ferenčík, M. (2015). Soil compaction of various central european forest soils caused by traffic of forestry machines with various chassis. Forest Systems, 24(3) doi:10.5424/fs/2015243-07541

Сведения об авторах

Клубничкин Евгений Евгеньевич – доцент кафедры колесных и гусеничных машин ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса», кандидат технических наук, доцент, г. Мытищи, Российская Федерация; e-mail: klubnichkin@mgul.ac.ru

Клубничкин Владислав Евгеньевич – доцент кафедры колесных и гусеничных машин ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса», кандидат технических наук, доцент, г. Мытищи, Российская Фе-

дерация; e-mail: vklubnichkin@mgul.ac.ru

Наказной Олег Алексеевич – профессор кафедры многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», доктор технических наук, профессор, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: nakaznoi@gmail.com

Наумов Валерий Николаевич – заведующий кафедрой многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: naumovvn@yandex.ru

Котиев Георгий Олегович – заведующий кафедрой колесных машин ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», доктор технических наук, профессор, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kotievgo@yandex.ru

Беляков Владимир Викторович – профессор кафедры автомобили и тракторы ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», доктор технических наук, профессор, почетный работник науки и техники РФ, г. Нижний Новгород, Российская Федерация; e-mail:nauka@nntu.nnov.ru

Зезюлин Денис Владимирович – доцент кафедры автомобили и тракторы ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», кандидат технических наук, доцент, г. Нижний Новгород, Российская Федерация; e-mail: balakhnaman@gmail.com

Information about authors

Klubnichkin Evgeny Evgenyevich – Associate Professor of Wheeled and Tracked Vehicles department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Moscow State Forest University», Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Mytishi, Russian Federation; e-mail: klubnichkin@mgul.ac.ru.

Klubnichkin Vladislav Evgenyevich – Associate Professor of Wheeled and Tracked Vehicles department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Moscow State Forest University», Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Mytishi, Russian Federation; e-mail: vklubnichkin@mgul.ac.ru.

Nakaznym Oleg Alexeyevich – Professor of multipurpose tracked vehicles and mobile robots Federal State Budget Education Institution of Higher Professional Education «Moscow State Technical University. NE Bauman», DSc in Engineering, Professor, Moscow, Russian Federation; e-mail: nakaznoi@gmail.com

Naumov Valeriy Nikolayevich – Head of the Department of multipurpose tracked vehicles and mobile robots Federal State Budget Education Institution of Higher Professional Education «Moscow State Technical University. NE Bauman», DSc in Engineering, Professor, Honored Worker of Science, Moscow, Russian Federation; naumovvn@yandex.ru

Kotiyev Georgey Olegovych – Head of wheeled vehicles Federal State Budget Education Institution of Higher Professional Education «Moscow State Technical University. NE Bauman», DSc in Engineering, Professor, Moscow, Russian Federation; e-mail: kotievgo@yandex.ru

Belyakov Vladimir Viktorovich – Professor of automobiles and tractors Federal State Budget Education Institution of Higher Professional Education «Nizhny Novgorod State Technical University. RE Alekseev», " DSc in Engineering, Professor, Honored worker of science and technology of the Russian Federation, Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: nauka@nntu.nnov.ru

Zezyulin Denis Vladimirovich – Associate Professor of automobiles and tractors Federal State Budget Education Institution of Higher Professional Education «Nizhny Novgorod State Technical University. RE Alekseev», Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: balakhnaman@gmail.com