

РЕЗУЛЬТАТЫ ДВУХФАКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЕРСПЕКТИВНОЙ МОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ ЛЕСОВОЗНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

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

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

доктор технических наук, доцент **В.А. Зеликов**

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

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

Обоснована необходимость снижения расходов на вывозку лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом для повышения эффективности лесозаготовок в РФ. Выявлены недостатки, имеющиеся у лесовозного автомобильного транспорта, оснащенного традиционными конструкциями подвесок, проявляющиеся при вывозке ими лесоматериалов по лесовозным дорогам низкого качества. Описано перспективное направление для повышения эксплуатационных свойств лесовозного автомобильного транспорта, применяемого для вывозки лесоматериалов, заключающееся в разработке эффективных конструктивных схем подвесок для лесовозного автомобильного транспорта с оптимальными параметрами поддресоривания. Рассмотрены научные работы зарубежных ученых в данном направлении. Разработана с учетом выявленных недостатков перспективная схема гидропневматической подвески модульного типа для лесовозного автомобильного транспорта, позволяющая рекуперировать энергию рабочей жидкости при движении лесовозного автомобильного транспорта по лесовозным дорогам низкого качества, компенсировать утечки рабочей жидкости, а также дистанционно из кабины водителя лесовозного автомобильного транспорта управлять величиной дорожного просвета. Выполнена двухфакторная оптимизация, позволяющая выявить благоприятные комбинации двух исследуемых факторов. Получены графики влияния диаметра пневмоцилиндра и коэффициента теплоотдачи на максимальное вертикальное ускорение поддресоренной массы, а также на максимальное давление газа в пневмоцилиндре и амплитуду изменения температуры. Представлены картограммы оптимизации конструктивных параметров перспективной гидропневматической подвески.

Ключевые слова: лесовозный автомобильный транспорт, двухфакторная оптимизация, гидропневматическая подвеска, вывозка лесоматериалов

TWO-FACTOR PARAMETER OPTIMIZATION OF PROMISING MODULAR HYDROPNEUMATIC SUSPENSION FOR LOGGING ROAD TRANSPORT

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

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

DSc (Engineering), Associate Professor **V.A. Zelikov**

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 to reduce the cost of timber haulage by logging road transport to increase the efficiency of logging in the Russian Federation has been substantiated. The drawbacks of the timber road transport equipped with traditional suspension systems, which are manifested when they transport timber along low quality logging roads, have been revealed. A promising direction for improving the operational properties of timber road transport used for hauling timber is described. It consists in the development of effective design schemes for suspensions for timber road transport with optimal suspension parameters. The scientific works of foreign scientists in this direction has been considered. Taking into account the identified shortcomings, a promising scheme of modular hydropneumatic suspension for timber road transport has been developed, which makes it possible to recuperate the energy of the working fluid when moving on the roads of low quality, compensate for leaks of working fluid, and also control the ground clearance from the driver's cab remotely. Two-factor optimization has been carried out, which allows identifying favorable combinations of the two factors under study. The graphs of the influence of the pneumatic cylinder diameter heat transfer coefficient on the maximum vertical acceleration of the sprung mass, as well as on the maximum gas pressure in the pneumatic cylinder and the amplitude of the temperature change have been obtained. The cartograms of optimization of the design parameters for perspective hydropneumatic suspension have been presented.

Keywords: logging transport, two-factor optimization, hydropneumatic suspension, timber hauling

Введение

Наша страна обладает значительными запасами лесных ресурсов, общая доля которых составляет около четвертой части всех ресурсов, сосредоточенных на планете. Важным технологическим звеном процесса лесозаготовок, на которое приходится наибольшая энергоемкость, является процесс вывозки лесоматериалов с лесосеки до потребителя лесовозными автомобилями (ЛА), выполняемый по существующим лесовозным дорогам. Удельный вес доли расходов, затрачиваемых на вывозку лесоматериалов ЛА, от суммарных затрат, расходуемых на обеспечение функционирования лесного хозяйства, составляет по разным оценкам 30-35 %. Издержки ЛА отрицательно отражаются на конечной себестоимости продукции и экономических результатах деятельности лесозаготовительных предприятий. Поэтому снижение расходов на вывозку лесоматериалов ЛА является важным резервом повышения эффективности лесозаготовок в РФ.

Эксплуатируемый в настоящее время на вывозке лесоматериалов лесовозный автомобильный транспорт удовлетворяет почти всем предъявляемым к нему потребителями требованиям. Несмотря на это, вывозка лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом, оснащенным традиционными конструкциями зависимых подвесок, в условиях лесовозных дорог низкого качества приводит к существенному ухудшению их эксплуатационных свойств, проявляющихся в следующем:

- в ограниченных значениях дорожного просвета и углов поворота управляемых колес ЛА; в снижении надежности, проходимости ЛА в сложных дорожных условиях за счет контакта выступающих узлов ЛА с лесовозной дорогой; в невозможности использования подрамного пространства, располагающегося между колесами ЛА;
- в значительной высоте центра тяжести ЛА, приводящей к ухудшению поперечной устойчивости загруженного ЛА; в отсутствии механизмов,

позволяющих регулировать высоту дорожного просвета ЛА; в невозможности использования подвесок, выполняемых в виде колесных модулей, из-за больших габаритных размеров и сложности конструктивного исполнения;

– отсутствие функциональной возможности вывешивания колес ЛА при его движении в порожнем состоянии; неспособность обеспечить индивидуальный поворот каждого из колес ЛА.

Повышение эксплуатационных свойств подвески играет особенно определяющее значение для ЛА, применяемого для вывозки лесоматериалов в РФ. Точность расчета конструктивных параметров поддрессорования, а также подбор оптимально подходящей для ЛА конструкции подвески дает возможность уменьшить количество денежных средств, расходуемых на вывозку лесоматериалов [1].

Demyanov D. N., Karabtsev V. S. и Malinov A. I. (2019) в своих исследованиях с целью повышения эффективности функционирования автомобиля с колесной формулой 8×8 разработали алгоритмы управления его гидропневматической подвеской в среде Simulink. Выполненная ими двухэтапная проверка позволила выявить, что работа полученных алгоритмов удовлетворяет всем предъявляемым к ним требованиям, опускание и подъем рамы автомобиля в процессе преодоления неровностей дороги выполняется равномерно, с низким коэффициентом погрешности [3].

Yesilyrt N. Y. и Akalin O. (2018) в своей работе акцентируют внимание на моделировании системы гидропневматической подвески при движении 10-тонного автомобиля по дорожным неровностям. Авторами были скорректированы параметры гидропневматической подвески с учетом коэффициента демпфирования кузова автомобиля. Выявлено, что предельная величина амплитуды вертикального перемещения сиденья водителя может быть нарушена в случае совпадения крейсерской скорости и колесной базы автомобиля с собственной частотой кузова автомобиля на низших скоростях. Также определено, что увеличение средней скорости автомобиля по неровной поверхности приводит к повышению амплитуды вертикального ускорения сиденья водителя [4].

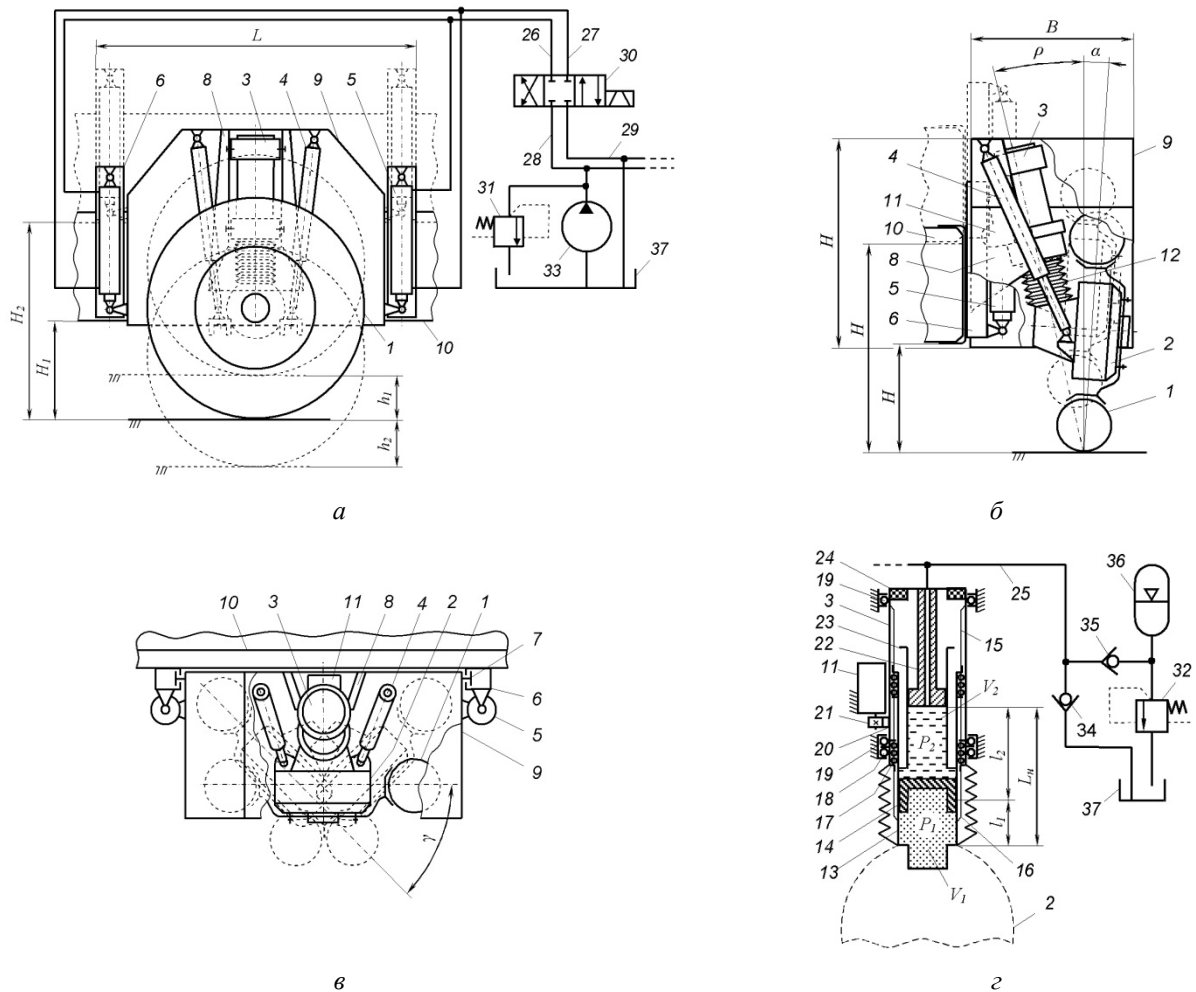
В статье Lin D., Yang F. и др. (2020) рассмотрены динамические свойства компактной гидропневматической амортизационной стойки авто-

мобиля, разработана методика комплексного эксперимента для исследования зависимостей силы трения от рабочего давления в стойке, силы смещения и давления, получена математическая модель амортизационной стойки, включающая процесс политропного газа, нелинейную и гистерезисную силу трения, а также турбулентные потоки через отверстия поршня. Выявлено, что разработанная математическая модель может с высокой точностью выполнять прогнозирование характеристик амортизационной стойки в динамике [5].

В работе Konieczny L. и др. (2016) выполнен анализ конструктивных решений и материалов, применяемых в газовых пружинах гидропневматических подвесок автомобилей. Авторами выявлены основные преимущества использования таких подвесок в легковых автомобилях, ими приведены фундаментальные зависимости, определяющие характеристики газовой пружины, а также описаны свойства материалов, используемых для производства деталей гидропневматической подвески с газовой пружиной [6].

В научной статье Yin Y., Rakheja S. и др. (2020) приведены результаты исследования зависящих от температуры и частоты демпфирующих свойств компактной гидропневматической амортизационной стойки. Разработана математическая модель, результаты расчета которой при различных температурах стойки и частотах возбуждения показали высокую сходимость с экспериментальными данными [7].

Ibrahim A. Badway и др. (2017) в своих исследованиях изучили рабочие характеристики и потенциал гидропневматической подвески, используемой в транспортном средстве, перемещающемся по дороге с неровностями. Разработанные для исследования математическая модель, а также испытательный стенд позволили выявить, что гидропневматическая подвеска обеспечивает комфорт и эффективное демпфирование при движении транспортного средства по дороге с неровностями [8].



а, б, в – кинематическая схема гидропневматической подвески, ее виды сбоку, сзади и сверху;

г – гидравлическая схема; 1 – колесо; 2 – гидравлический двигатель; 3 – пневмогидравлический цилиндр; 4 – амортизаторы; 5 – гидроцилиндры; 6 – ползуны; 7 – направляющие; 8 – кронштейны; 9 – рама модуля; 10 – рама автомобиля; 11 – шаговый гидродвигатель; 12 – гофрированный защитный кожух; 13 – подвижный пневмоцилиндр; 14 – поршень; 15 – внутренние шлицы; 16 – внешние шлицы; 17 – шарики; 18 – радиальные подшипники; 19 – упорный шарикоподшипник; 20 – зубчатый сектор; 21 – шестерня; 22 – верхний конец штока; 23 – гидроцилиндр; 24 – буфер сжатия; 25-29 – трубопроводы; 30 – гидрораспределитель; 31, 32 – предохранительные клапаны; 33 – гидронасос; 34, 35 – обратные гидравлические клапаны; 36 – пневмогидравлический аккумулятор; 37 – гидробак

Рис. 1. Схема гидропневматической подвески модульного типа для ЛА (собственные разработки)

Выполненный анализ существующих работ показал, что в настоящий период времени отсутствуют конструкции гидропневматических подвесок модульного типа для ЛА, обеспечивающие рекуперацию гидравлической энергии при преодолении неровностей и препятствий лесовозной дороги, компенсацию утечек рабочей жидкости, а также дистанционное управление из кабины ЛА величиной дорожного просвета. С целью устранения рассмотренных выше недостатков существующих

конструкций подвесок авторами была предложена перспективная схема модульной гидропневматической подвески для ЛА (рис. 1) [2].

Материалы и методы

Для поиска наилучших параметров предлагаемой конструкции гидропневматической подвески модульного типа необходимо выполнить двухфакторную оптимизацию, позволяющую исследовать одновременное влияние двух параметров на показатели эффективности, а также выявить благоприятные

комбинации двух факторов, которые не могут быть явно определены в результате исследования соответствующих однофакторных зависимостей [9-12].

Для проведения исследования использовалась ранее разработанная математическая модель движения лесовозного автомобиля, оснащенного гидропневматической подвеской [1]. Из большого количества конструктивных параметров гидропневматической подвески ЛА выбраны два параметра, наиболее существенно влияющие на эффективность: диаметр пневматического цилиндра D и коэффициент теплоотдачи $k_{то}$.

В качестве показателей эффективности гидропневматической подвески ЛА выбраны: максимальное вертикальное ускорение a_{zm} поддресоренной массы, максимальное давление P_m в пневмоцилиндре, максимальная амплитуда ΔT_m колебаний температуры газа в пневмоцилиндре. Под максимальными понимаются максимальные значения показателей при движении исследуемой механической системы по участку случайной неровной поверхности длиной 60 м на протяжении 20 с горизонтальной скоростью 3 м/с.

В этом случае задачу оптимизации конструктивных параметров можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} a_{zm}(D, k_{то}) \rightarrow \min; \\ P_m(D, k_{то}) \rightarrow \min; \\ \Delta T_m(D, k_{то}) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow D^{opt}, k_{то}^{opt}. \quad (1)$$

Для решения такой задачи оптимизации выполняется поиск такого интервала изменения исследуемых факторов D и $k_{то}$, в котором одновременно будут минимальными вертикальное ускорение a_{zm} , давление P_m и амплитуда колебания температуры ΔT_m газа в пневмоцилиндре.

Для решения двухфакторной задачи оптимизации провели девять компьютерных экспериментов, в которых изменяли диаметр пневмоцилиндра D на уровнях 0,2, 0,3, 0,4 м при одновременном изменении коэффициента теплоотдачи $k_{то}$ на уровнях 0, 1, 2 с⁻¹. Исходя из физического смысла коэффициента теплоотдачи, расширенной единицей измерения является К/(с·К), то есть на сколько градусов Кельвина изменяется температура газа в пневмоцилиндре за одну секунду при разнице температур газа и окружающей среды в один градус Кельвина.

На основе набора данных, полученного в результате проведения девяти оптимизационных компьютерных экспериментов, получены аналитические формулы для функций $a_{zm}(D, k_{то})$, $P_m(D, k_{то})$ и $\Delta T_m(D, k_{то})$. Данные формулы имеют высокую практическую ценность на этапе конструирования гидропневматической подвески ЛА, так как позволяют оценить ее показатели эффективности, не используя длительных компьютерных расчетов. С целью нахождения аналитических зависимостей функции $a_{zm}(D, k_{то})$, $P_m(D, k_{то})$ и $\Delta T_m(D, k_{то})$ выполнили аппроксимацию полиномов второго порядка

$$K(D, k_{то}) = k_1 D^2 + k_2 k_{то}^2 + k_3 D \cdot k_{то} + k_4 D + k_5 k_{то} + k_6, \quad (2)$$

где K – искомым критерий оптимизации; $k_1 \dots k_6$ – значения параметров полинома.

Для нахождения значений параметров полиномов использовался метод наименьших квадратов. Данный метод позволяет минимизировать сумму квадратов возможных отклонений аналитической зависимости от полученных результатов компьютерного моделирования:

$$\sum_{i=1}^{N_{КЭ}} (K_{аналит.}(D^i, k_{то}^i) - K_{КЭ}^i(D^i, k_{то}^i))^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $N_{КЭ}$ – общее количество проводимых в программе компьютерных экспериментов; i – номер проводимого в программе компьютерного эксперимента; $K_{аналит.}$ – полиномиальная зависимость влияния на критерий K факторов D и $k_{то}$; $K_{КЭ}^i$ – рассчитанное в программе в i -м компьютерном эксперименте с параметрами D^i и $k_{то}^i$ значение критерия K .

Выполнение аппроксимации методом наименьших квадратов осуществлялось в программе для инженерных расчетов MathCAD 14. Использование этой программы дало возможность выявить такие аналитические зависимости, которые позволяют определять значения показателей эффективности гидропневматической подвески ЛА:

$$a_{zm}(D, k_{то}) = 0,052 k_{то}^2 - 0,273 k_{то} + 3,15; \quad (4)$$

$$P_m(D, k_{то}) = 210,7D^2 + 0,057 \cdot 10^{-3} k_{то}^2 + 1,10D \cdot k_{то} - 171,3D - 0,620 k_{то} + 37,80; \quad (5)$$

$$\Delta T_m(D, k_{то}) = 1,00 k_{то}^2 - 11,60 k_{то} + 179,4; \quad (6)$$

где D – диаметр пневматического цилиндра, м; $k_{то}$ – коэффициент теплоотдачи, с⁻¹; a_{zm} – минимальное вертикальное ускорение, м/с²;

P_m – давление, МПа; ΔT_m – амплитуда колебаний температуры, К.

Результаты и обсуждение

Выявленные зависимости позволяют с высокой скоростью выполнить оценку показателей эффективности гидропневматической подвески ЛА. Для дальнейшего анализа функции $a_{zm}(D, k_{то})$, $P_m(D, k_{то})$ и $\Delta T_m(D, k_{то})$ приведены в виде графиков (рис. 2) и картограмм (рис. 3).

Построенные графики дают возможность визуально оценить характер влияния диаметра пневмоцилиндра и коэффициента теплоотдачи на показатели эффективности гидропневматической подвески ЛА. В частности, обнаружено, что диаметр пневмоцилиндра практически не влияет на a_{zm} и ΔT_m (рис. 2, а, в), а коэффициент теплоотдачи практически не влияет на P_m (рис. 2, б).

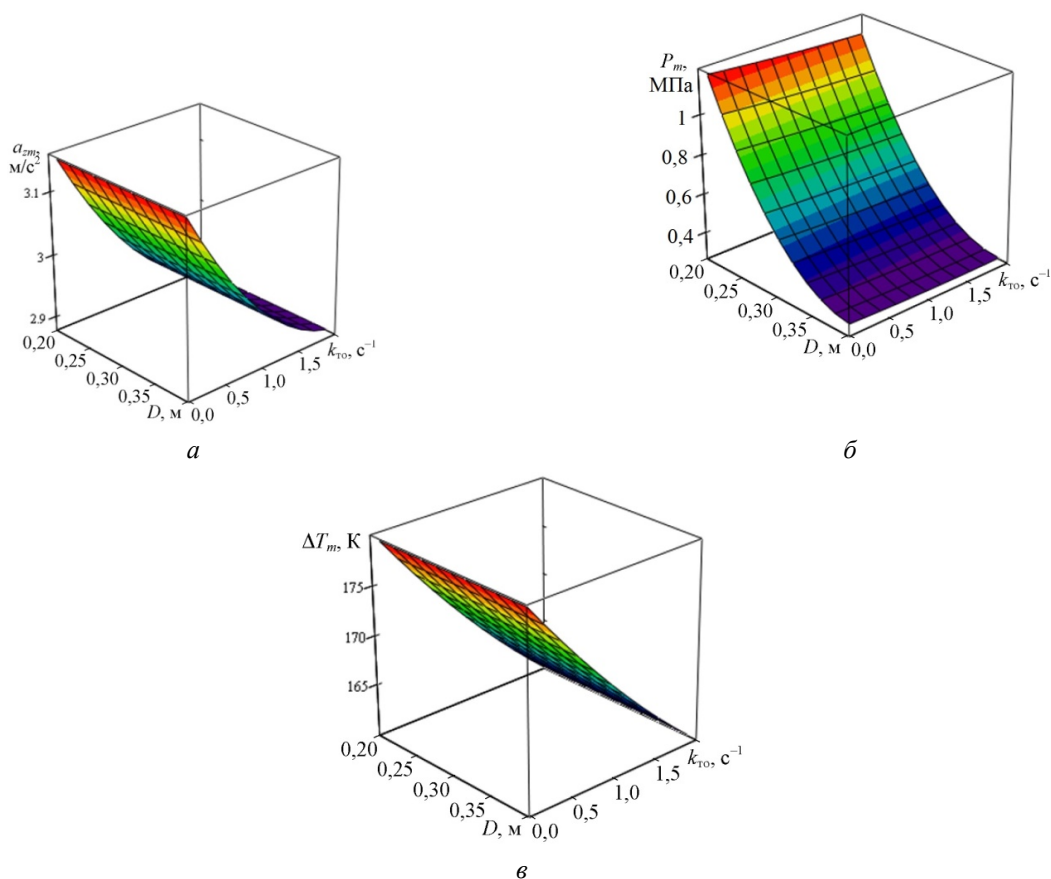


Рис. 2. Графики влияния диаметра пневмоцилиндра D и коэффициента теплоотдачи $k_{то}$ на максимальное вертикальное ускорение подвешенной массы a_{zm} (а), максимальное давление газа в пневмоцилindre P_m (б) и амплитуду изменения температуры ΔT_m (в) (собственные разработки)

Графики (рис. 2) позволяют понять качественный уровень полученных закономерностей, с целью понимания количественного уровня выявленных закономерностей графики были преобразованы в картограммы, которые являются видом сверху на графики, а также имеют обозначенные поверхности отклика линиями уровня (рис. 3).

Если диаметр пневмоцилиндра составляет 0,30 м (точка *A*) и коэффициент теплоотдачи – $1,0 \text{ с}^{-1}$ (точка *B*), то точка *C*, являющаяся точкой факторного пространства, будет располагаться ближе к линии уровня 2,95. Таким образом, максимальное вертикальное ускорение составит около $2,97 \text{ м/с}^2$.

На картограммах затемнены области благоприятных (в данном случае минимальных) значений показателей. В результате выполнения разделения на неблагоприятные и благоприятные области пороговые значения показателей эффективности составили: $a_{zm} = 3,00 \text{ м/с}^2$ (рис. 3, *a*), $P_m = 0,5 \text{ МПа}$ (рис. 3, *б*), $\Delta T_m = 170 \text{ К}$ (рис. 3, *в*), исходя из условий, что благоприятная область будет занимать значительную долю факторного пространства, включать искомые наименьшие значения критерия и граница области будет представлять собой линию уровня на картограмме.

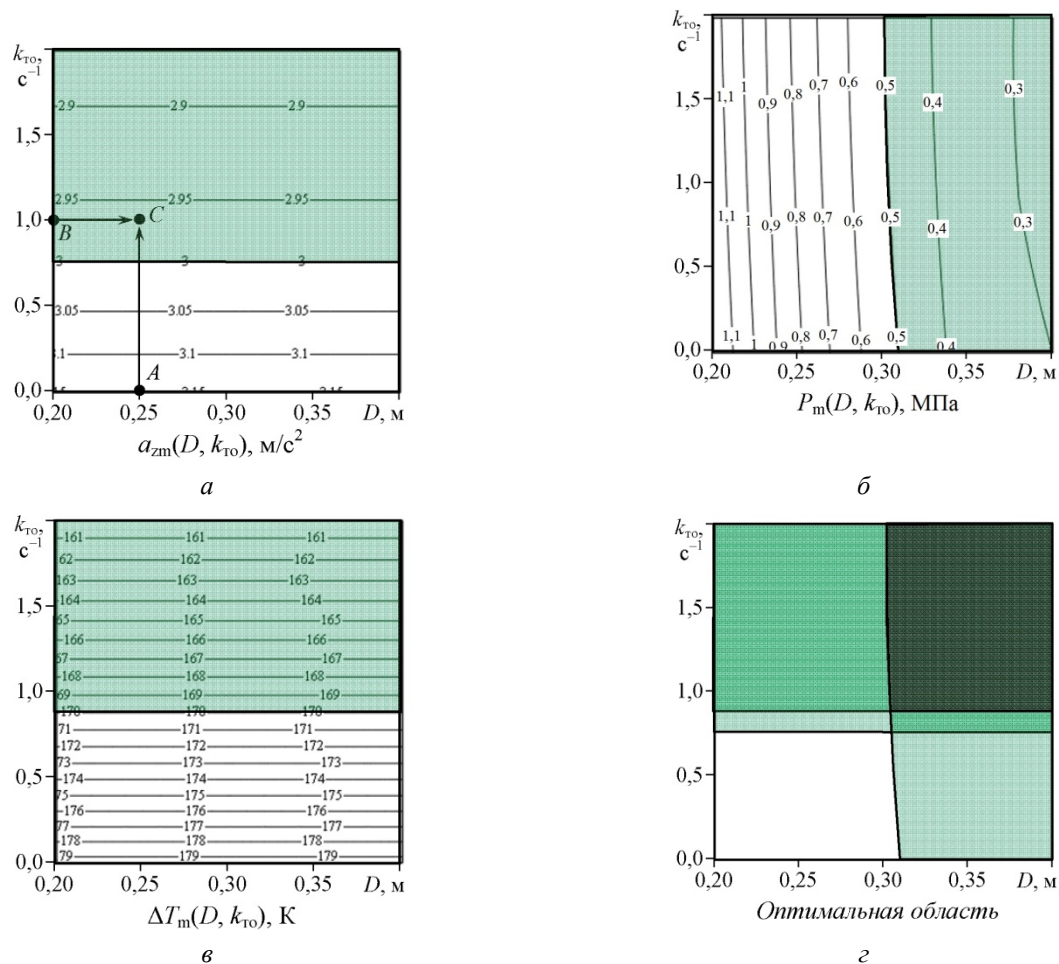


Рис. 3. Картограммы оптимизации конструктивных параметров гидропневматической подвески
Затемнены благоприятные области факторного пространства
(собственные разработки)

Оптимальная область (рис. 3, з), образуемая в результате пересечения благоприятных областей, позволяет одновременно учитывать требования минимума показателей эффективности.

Выводы

На основе анализа существующих работ в области подвесок транспортных средств предложена перспективная конструкция модульной гидропневматической подвески для ЛА, позволяющая устранить основные недостатки традиционных конструкций подвесок, а также рекуперировать энергию рабочей жидкости при движении ЛА по лесовозным дорогам низкого качества, компенсировать утечки рабочей жидкости, а также дистан-

ционно из кабины водителя ЛА управлять величиной дорожного просвета.

Для оптимизации параметров гидропневматической подвески ЛА в работе была применена двухфакторная оптимизация с анализом наглядных картограмм. В результате двухфакторной оптимизации гидропневматической подвески ЛА обнаружено, что оптимальный диаметр пневмоцилиндра составляет 0,31 ... 0,40 м, оптимальный коэффициент теплоотдачи – 0,9 ... 2,0 с⁻¹. При этом максимальное вертикальное ускорение составит не более 3 м/с², максимальное давление газа в пневмоцилиндре составит не более 0,5 МПа, максимальная амплитуда колебаний температуры составит не более 170 К.

Библиографический список

1. Оценка эффективности гидропневматической подвески лесовозного автомобиля по результатам имитационного моделирования / В. И. Посметьев, М. В. Драпалюк, В. О. Никонов [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2020. – № 2. – С. 218–232.
2. Состояние и перспективы совершенствования конструкций гидропневматических подвесок колесных машин / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, Д. Л. Свиридов, В. О. Бородкин // Воронежский научно-технический вестник. – 2019. – Т. 2. – № 2 (28). – С. 19–37.
3. Demyanov, D. N. Clearance control of vehicle with hydropneumatic suspension and the wheel formula 8×8 / D. N. Demyanov, V. S. Karabtsev, A. I. Malinov // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 489. – 2019. – P. 012053. – DOI 10.1088/1757-899X/489/1/012053.
4. Yesilyrt, H. Y. Ride dynamics of an off road vehicle with hydropneumatic suspension system / H. Y. Yesilyrt, O. Akalin // 9th International Automotive Technologies Congress OTEKJN. – 2018, Bursa.
5. Design and experimental modeling of a compact hydro-pneumatic suspension strut / D. Lin, F. Yang, D. Gong, S. Rakheja // Nonlinear Dyn. – 2020. – 10 p. – DOI: 10.1007/s11-71-020-05714-3.
6. Konieczny, L. Analysis of structural and material aspects of selected elements of a hydropneumatic suspension system in a passenger car / L. Konieczny, R. Burdzic, T. Wegrzyn // Arch. Metall. Mater. – 2016. – Vol. 61. – № 1. – P. 79–84. – DOI 10.1515/AMM-2016-0018.
7. Hydraulic damping nonlinearity of a compact hydro-pneumatic suspension considering gas/oil emulsion / Y. Yin, S. Rakheja, J. Yong, A. Lozano-Guzman // Vibroengineering PROCEDIA. – 2020. – Vol. 30. – P. 68–71. – DOI: 10.21595/vp.2019.20715.
8. Badway, I. A. Simulation and control of a hydrohneumatic suspension system / I. A. Badway, M. I. Sokar, S. A. Raboo // International Journal of Scientific Engineering Research. – 2017. – Vol. 8. – Iss. 9. – P. 930–935.
9. Федоров, В. В. Теория оптимального эксперимента. – Москва : ГРФМЛ изд-ва Наука, 1971. – 312 с.
10. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях : учеб. пособие / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с. – Библиогр.: с. 284–286. – ISBN 5-283-04480-7.
11. Горский, В. Г. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики) : учеб. пособие / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер, А. М. Талалай. – Москва : Металлургия, 1978. – 112 с. – Библиогр.: с. 105–110.
12. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений : учеб. пособие / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 279 с.

References

1. Posmetev V.I., Drapalyuk M.V., Nikonov V.O., Posmetev V.V., Avdyuhin A.V. (2020) *Ocenka effektivnosti gidropnevmaticheskoi podveski lesovoznogo avtomobilya po rezul'tatam imitacionnogo modelirovaniya* [Evaluation of the effectiveness of hydropneumatic suspension of a timber truck based on the results of simulation]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 10, № 2, pp. 218-232 (in Russian).
2. Nikonov V.O., Posmetev V.I., Sviridov D.L., Borodkin V.O. (2019) *Sostoyanie i perspektivi sovershenstvovaniya konstrukcii gidropnevmaticheskikh podvesok kolesnih mashin* [Status and prospects for improving the design of hydropneumatic suspensions of wheeled vehicles]. *Voronezhskii nauchno-tehnicheskii vestnik* [Voronezh Scientific and Technical Bulletin], Vol. 2, № 2 (28), pp. 19-37 (in Russian).
3. Demyanov D.N., Karabtsev V.S., Malinov A.I. (2019) Clearance control of vehicle with hydropneumatic suspension and the wheel formula 8×8. *Materials Science and Engineering* 489: 012053. DOI: 10.1088/1757-899X/489/1/012053.
4. Yesilyrt H.Y., Akalin O. (2018) Ride dynamics of an off road vehicle with hydropneumatic suspension system. *9th International Automotive Technologies Congress OTEKJN*, 2018, Bursa.
5. Lin D., Yang F., Gong D., Rakheja S. (2020) Design and experimental modeling of a compact hydro-pneumatic suspension strut. *Nonlinear Dyn*, doi: 10.1007/s11-71-020-05714-3.
6. Konieczny L., Burdzic R., Wegrzyn T. (2016) Analysis of structural and material aspects of selected elements of a hydropneumatic suspension system in a passenger car. *Arch. Metall. Mater.*, Vol. 61, № 1, pp. 79-84. DOI: 10.1515/AMM-2016-0018.
7. Yin Y., Rakheja S., Yong, J. Lozano-Guzman A. (2020) Hydraulic damping nonlinearity of a compact hydro-pneumatic suspension considering gas-oil emulsion. *Vibroengineering PROCEDIA*, Vol. 30, pp. 68-71. DOI: 10.21595/vp.2019.20715.
8. Badway I.A., Sokar M.I., Raboo S.A. (2017) Simulation and control of a hydrohneumatic suspension system. *International Journal of Scientific Engineering Research*, Vol. 8, Iss. 9, September, pp. 930-935.
9. Fedorov V.V. *Teoriya optimalnogo eksperimenta* [Optimal experiment theory]. Moscow: GRFML Publishing House Nauka, 1971, 312 p. (in Russian).
10. Granovskii V.A., Siraya T.N. *Metodi obrabotki eksperimentalnih dannih pri izmereniyah* [Methods for processing experimental data in measurements]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningr. Otd-nie, 1990, 288 p. (in Russian).
11. Gorskii V.G., Adler Yu.P., Talalai A.M. *Planirovanie promishlennih eksperimentov (modeli dinamiki)* [Planning of industrial experiments (dynamics models)]. Moscow: Metallurgy, 1978, 112 p. (in Russian).
12. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnih reshenii* [Planning an experiment when searching for optimal solutions]. Moscow: Nauka [Science], 1976, 279 p. (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: posmetuev@mail.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.

Зеликов Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: zelikov-vrn@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, 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.

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.

Zelikov Vladimir Anatolyevich – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: zelikov-vrn@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.