

Л.В. Барахтанов, С.Е. Манянин, П.Е. Дмитриев
**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНЫХ ЦЕПЕЙ
ПРИ ДВИЖЕНИИ МАШИНЫ ПО СНЕЖНОЙ ЦЕЛИНЕ
И УКАТАННЫМ ЗАСНЕЖЕННЫМ ДОРОГАМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассматривается влияние предварительного статического натяжения гусеничных цепей на проходимость машины по снегу. Разработана математическая модель ходовой части, позволяющая учитывать внутренние силы сопротивления, возникающие в ходовой части машины. Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказана целесообразность применения регулирования натяжения гусениц при движении по снегу.

Ключевые слова: гусеничная машина, сопротивление движению, гусеничная цепь, натяжение гусениц.

1.1 Влияние предварительного статического натяжения гусеничных цепей на проходимость машин по снегу

До настоящего времени среди специалистов нет единого мнения по вопросу влияния предварительного статического натяжения гусениц на проходимость машин по снегу. Так, Н.И. Груздев, рассматривая проходимость танка по снежной целине, приходит к выводу, что «туго натянутая гусеница улучшает, а слабо натянутая гусеница ухудшает проходимость танка при движении по снегу» [1]. Аналогичного мнения придерживается Н.А. Носов, считая, что максимальное натяжение гусениц будет способствовать повышению проходимости [2]. К диаметрально противоположному выводу приходит В.Ф. Платонов при анализе влияния предварительного натяжения на эксплуатационные качества гусеничных машин: «При сравнительном исследовании проходимости различных машин на снежной целине установлено, что с повышением статического натяжения проходимость резко ухудшается. Так, например, создание натяжения 1500 кгс приводило к потере проходимости машин весовых классов 8 и 16 т на снежной целине 500 мм. Снижение же статического натяжения до 500-700 кгс обеспечивало возможность преодоления такого покрова» [3]. Поэтому проблема влияния предварительного статического натяжения гусениц на проходимость машин по снежной целине является актуальной.

С ростом статического натяжения гусениц происходит перераспределение нагрузок по каткам, уменьшаются нагрузки под крайними катками. При этом возрастает максимальное пиковое давление гусеничного движителя на снег (рис.1), что ведет к росту сопротивления движению и, как следствие, ухудшению проходимости машины.

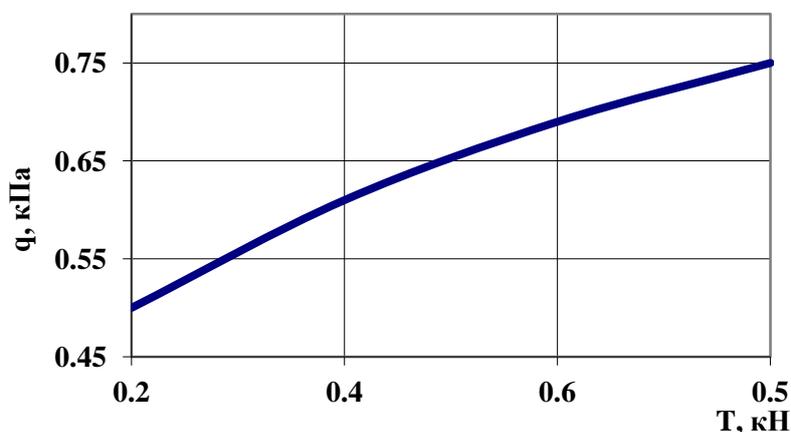


Рис. 1. Зависимость давления от натяжения гусеничной цепи

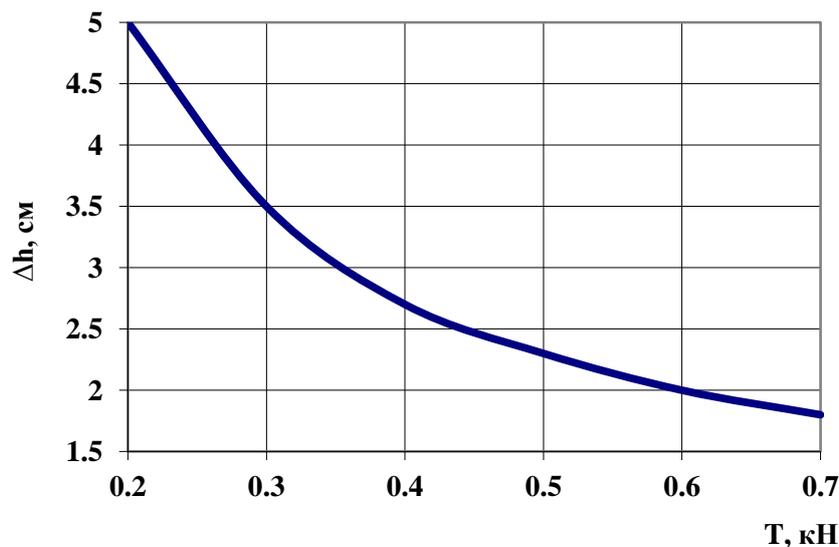


Рис. 2. Зависимость деформации снега в межкатковом пространстве от натяжения гусеничной цепи

С другой стороны, с ростом статического натяжения увеличивается приведенная изгибная жесткость гусеницы, что уменьшает её выпучивание и снижает силу сопротивления, обусловленную дополнительной деформацией снега, выдавленного в межкатковое пространство (рис. 2), а это должно привести к повышению проходимости машины.

Взаимодействие этих двух противоположных тенденций и определяет сопротивление движению. Проведенные для разных машин расчетно-теоретические исследования показали, что при увеличении статического натяжения может получиться как повышение, так и снижение сопротивления движению гусеничных машин по снегу. Поэтому при ответе на вопрос о влиянии предварительного статического натяжения гусениц на проходимость машин по снегу следует исходить из анализа конкретных объектов исследования. На рис. 1.3 приведены результаты такого анализа для машин ТТС 34016 «Ветлуга-Арктика». Пунктирными линиями на графике (рис. 3) показана область изменения внешней силы сопротивления движению (P_f), построенная для различных типов снега. Сплошной линией показано изменение силы внутреннего сопротивления (P_f') от силы статического натяжения (T_c). При небольших значениях T_c основную долю (80-85%) в общем сопротивлении движению составляет внешняя сила сопротивления движению. Увеличение статического натяжения ведет к увеличению внутренних сопротивлений в ходовой части, обусловленных потерями в шарнирах гусеницы; потерями на трение в опорных и поддерживающих катках, ведущих и направляющих колес; потерями, возникающими в результате взаимодействия между звеньями гусениц и деталями, оформляющими контур обвода; потерями в зацеплении. С ростом T_c увеличивается вклад силы внутреннего сопротивления в общее сопротивление движению, она становится сравнима с внешним сопротивлением, а при больших значениях T_c даже превышает его.

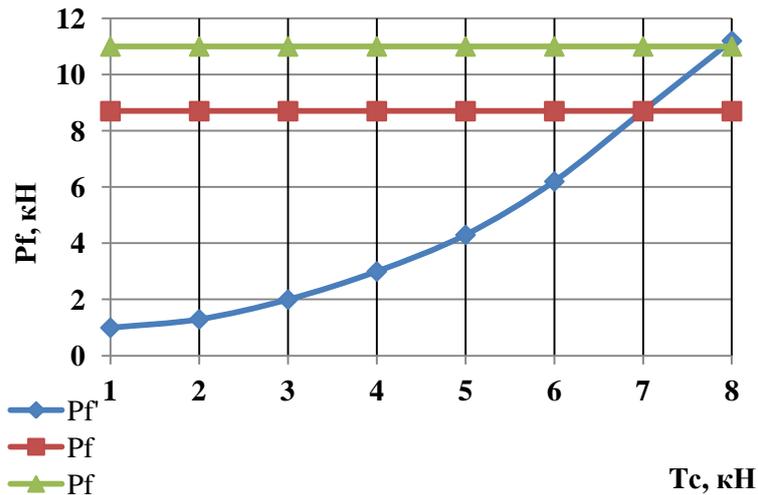


Рис. 3. Зависимость силы сопротивления от натяжения гусеничной цепи

Тогда для обеспечения движения машины нам нужно увеличить усилие на ведущем колесе, которое при определенных значениях T_c становится больше, чем сила тяги, реализуемая в контакте движителя со снегом. Происходит срыв снега, интенсивно развивается буксование, приводящее к падению силы тяги, и проходимость машины падает. Таким образом, для гусеничных машин можно четко ответить на поставленный вопрос – с увеличением статического натяжения проходимость по снегу ухудшается. В связи с тем, что плотном пути для гусеничных машин, работающих в зимний период, служит не только снег в своем естественном слое (укатанные заснеженные дороги), необходимо рассмотреть и данные условия эксплуатации. Для исследования регулирования натяжения гусениц при движении по укатанным заснеженным дорогам требуется составить математическую модель ходовой части и уравнения движения машины.

1.2. Модель ходовой части и уравнение движения

Составим в общем виде математическую модель ходовой части гусеничной машины с регулируемым обводом.

Для составления математической модели ходовой части гусеничной машины и вывода уравнений движения воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода, которые в общем виде могут быть записаны:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} = \sum_{r=1}^m \lambda_r \frac{\partial f_r}{\partial q_i} + \sum \mu_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial q_i} + R_i \quad (1)$$

где T , Π , Φ – кинетическая, потенциальная энергия и функция рассеивания;

q_i – обобщенные координаты;

R_i – обобщенные силы;

λ_r, μ_j – неопределенные множители Лагранжа;

f_r – уравнение геометрических связей вида

$$f_r(t, q_1, \dots, q_i, \dots, q_m) = 0; \quad r=1, \dots, m$$

$$\varphi_j(t, q_1, \dots, q_i, \dots, q_n, q_1, \dots, q_i, \dots, q_n) = 0, j = 1, \dots, l$$

Рассмотрим плоское движение гусеничной машины. Введем три системы координат (рис. 4): неподвижную $XOZ(\Sigma)$, $X1O1Z1(\Sigma1)$ движущуюся поступательно вместе с центром масс машины $X2O2Z2(\Sigma2)$ – совершающую аффинное движение относительно системы $X1O1Z1$. Центр масс задается вектором \vec{r}_c (рис. 4). В качестве обобщенных координат выбираем: координаты центра масс X_c, Z_c углы поворота корпуса φ , ведущего колеса Ψ_1 , на-

правящего колеса Ψ_2 , угол отклонения кривошипа (вектор \overline{Ha}) Θ от оси Z_2 , перемещение механизма S , угол отклонения J балансира (вектор $\overline{Kj_0}$) от оси $X_1\xi_j$, угол поворота φ_j катка. Для каждого трака вводятся две координаты центра масс X_n, Z_n (в системе Σ_1) и угол отклонения трака γ_n относительно оси X_1 .

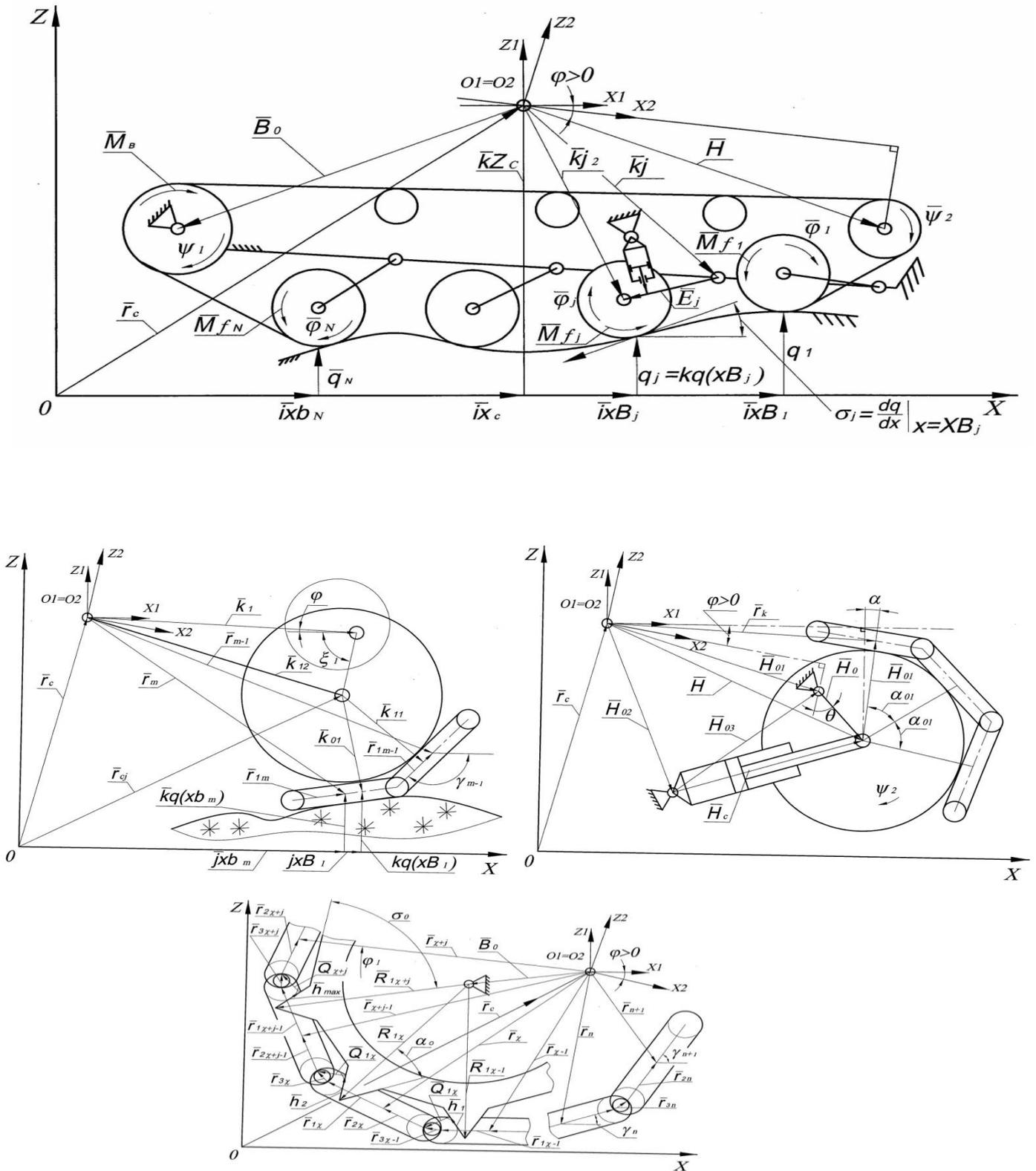


Рис. 4. Схема взаимодействия гусеничного движителя с опорной поверхностью.

Проведя исследование связей, наложенных на систему, и определив кинетическую, потенциальную энергии, функции рассеяния, обобщенные силы получим после ряда преобразований систему уравнений, описывающих движение ходовой части машины.

По координате X_c (описывают движение центра масс)

$$Mc\ddot{X}_c + \dot{X}_c^2 = \sum_{j=1}^{2N} \mu_{xj} \quad (2)$$

По координате Z_c (описывают движение центра масс)

$$M(\ddot{Z}_c + g) = \sum_{j=1}^{2N} \mu_{zj} \quad (3)$$

По координате φ (характеризует равновесие моментов относительно центра масс)

$$\begin{aligned} J_0\ddot{\varphi} + \sum_{j=1}^{2N} [m_{1j}K_j^2\ddot{\varphi} + m_{2j}K_jb_j(\ddot{\xi}_j \sin(\varphi + \xi_j + A_{kj})) + \dot{\xi}_j^2 \cos(\varphi + \xi_j + A_{kj})] - m_{3j}g(X_2K_j \cos \varphi \\ + Z_2K_j \sin \varphi) - C_{\xi j}(\xi_{0j} - \varphi - \xi_j) + 2m_s\{(H_{01}^2 + Q_0^2)\ddot{\varphi} - Q^2\ddot{\theta} \\ + [(\ddot{\theta} - 2\ddot{\varphi}) \sin(\theta + A_s) + (\dot{\theta} - 2\dot{\varphi})\dot{\theta} \cos(\theta + A_s)]Q_0H_{01}\} - m_s g[X_2H_{01} \cos \varphi \\ + Z_2H_{01} \sin \varphi + Q_0 \sin(\theta + \varphi)] + \sum_{j=1}^{2N} \mu_{ij}P_j^2(\dot{\varphi} + \dot{\xi}_j) = 2(D_{\varphi,b} + D_{\varphi,n}) \\ + \sum_{j=1}^{2N} [\mu_{x,j}(Z_2K_j \cos \varphi - X_2K_j \sin \varphi) - \mu_{z,j}(X_2K_j \cos \varphi + Z_2K_j \sin \varphi) \end{aligned} \quad (4)$$

По координате Θ (описывает движение центра масс направляющего колеса)

$$\begin{aligned} m_s \{Q_0^2(\ddot{\theta} - \ddot{\varphi}) + [\ddot{\varphi} \sin(\theta + A_s) + \dot{\varphi}^2 \cos(\theta + A_s)]Q_0H_{01}\} + m_s gQ \sin(\theta - \varphi) + F_1 \\ + 2F_2(\theta - \theta_c) - \sum_{k=n+1}^{n+\infty} [\lambda_{x,k} Q_0 \cos(\theta - \varphi) + \lambda_{z,k} Q_0 \sin(\theta - \varphi)] \\ = (-1)\mu_{si}P_s^3\dot{\theta}^2 \sin[\dot{\theta}] + \delta P_u F \sin[\dot{\theta}] \end{aligned} \quad (5)$$

По координате Ψ_1 (характеризуют равновесие момента инерции, приложенного к ведущему колесу)

$$J_1\ddot{\varphi}_1 = M_{b,n} + M_b \quad (6)$$

По координате Ψ_2 (характеризует равновесие моментов на направляющем колесе)

$$J_2\ddot{\varphi}_2 = M_n \quad (7)$$

По координате φ_1 (описывает вращательное движение опорных катков)

$$J_{k1}\ddot{\varphi}_1 + R_1(\lambda_{x,m-1} \cos \gamma_{m-1} + \lambda_{z,m-1} \sin \gamma_{m-1}) = (-1)(a_1R_1 + c_1f_{k1}) \quad (8)$$

По координате φ_j

$$J_{k1}\ddot{\varphi}_1 = (-1)(a_j R_j + j f_{kj}) \quad (9)$$

По координате φ_N

$$J_{kN}\ddot{\varphi}_N + R_N(\lambda_{x,m+\alpha 3} \cos \gamma_{m+\alpha 3} + \lambda_{z,m+\alpha 3} \sin \gamma_{m+\alpha 3}) = (-1)(a_N R_N + c_N f_{kN}) \quad (10)$$

По координате ξ_1 (описывает движение центров масс катков относительно осей вращения балансиров)

$$\begin{aligned} m_{31}b_1^2\ddot{\xi}_1 + m_{21}k_1b_1[\ddot{\varphi} \sin(\varphi + \xi_1 + A_{k1}) + \dot{\varphi}^2 \cos(\varphi + \xi_1 + A_{k1})] + C_{\xi_1}(\xi_{01} - \varphi - \xi_1) \\ + m_{21}gb_1 \cos \xi_1 + \mu_{1i}P_1^2(\dot{\varphi} + \dot{\xi}_1) \\ = b_1(\mu_{x1} \sin \xi_1 - \mu_{z1} \cos \xi_1 - \lambda_{x,m-1} \sin \xi_1 + \lambda_{z,m-1} \cos \xi_1) \end{aligned} \quad (11)$$

По координате ξ_j

$$\begin{aligned} m_{3j}b_j^2\ddot{\xi}_j + m_{2j}k_jb_j[\ddot{\varphi} \sin(\varphi + \xi_j + A_{kj}) + \dot{\varphi} \cos(\varphi + \xi_j + A_{kj})] - C_{\xi_j}(\xi_{0j} - \varphi - \xi_j) \\ - m_{2j}gb_j \cos \xi_j + \mu_{ij}P_j^2(\dot{\varphi} + \dot{\xi}_j) = b_j(\mu_{xj} \sin \xi_j - \mu_{zj} \cos \xi_j) \end{aligned} \quad (12)$$

По координате ξ_N

$$\begin{aligned} m_{3N}b_N^2\ddot{\xi}_N + m_{2N}k_Nb_N[\ddot{\varphi} \sin(\varphi + \xi_N + A_{kN}) + \dot{\varphi}^2 \cos(\varphi + \xi_N + A_{kN})] - C_{\xi_N}(\xi_{0N} - \varphi - \xi_N) \\ - m_{2N}gb_N \cos \xi_N + \mu_{iN}P_N^2(\dot{\varphi} + \dot{\xi}_N) \\ = b_N(\mu_{xN} \sin \xi_N - \mu_{zN} \cos \xi_N - \lambda_{x,m+\alpha 3} \sin \xi_N + \lambda_{z,m+\alpha 3} \cos \xi_N) \end{aligned} \quad (13)$$

Полученная система (2-13) замкнута, все необходимые величины определены.

Данная математическая модель была реализована. В качестве исходных данных задаются конструктивные параметры машины и характеристики опорной поверхности.

1.3. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования

Оценка достоверности разработанной математической модели, алгоритма и программы расчета была проведена на единичной неровности, гармоническом профиле и реальном (случайном) микропрофиле дороги.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных показало удовлетворительную сходимость результатов (рис. 5, 6).

Ранее (п. 1.1) было показано, что снижение предварительного статического натяжения приводит к повышению проходимости машин по снежной целине. В зимний период машины эксплуатируются и по укатанным заснеженным дорогам, где движение происходит на высоких скоростях и на первое место выдвигаются вопросы динамики ходовой части. При этом возникает задача обеспечения устойчивости обвода. Анализ известных работ в этой области [2-4], проведенный нами, показал, что наиболее эффективным средством обеспечения динамической устойчивости обвода, уменьшения величины динамических нагрузок является применение механизмов, изменяющих периметр обвода в движении. В ка-

честве конкретных объектов исследования, на которых проверялась целесообразность изменения натяжения гусеничных лент в движении, были выбраны машины ГАЗ-3402, ТТС 34016.

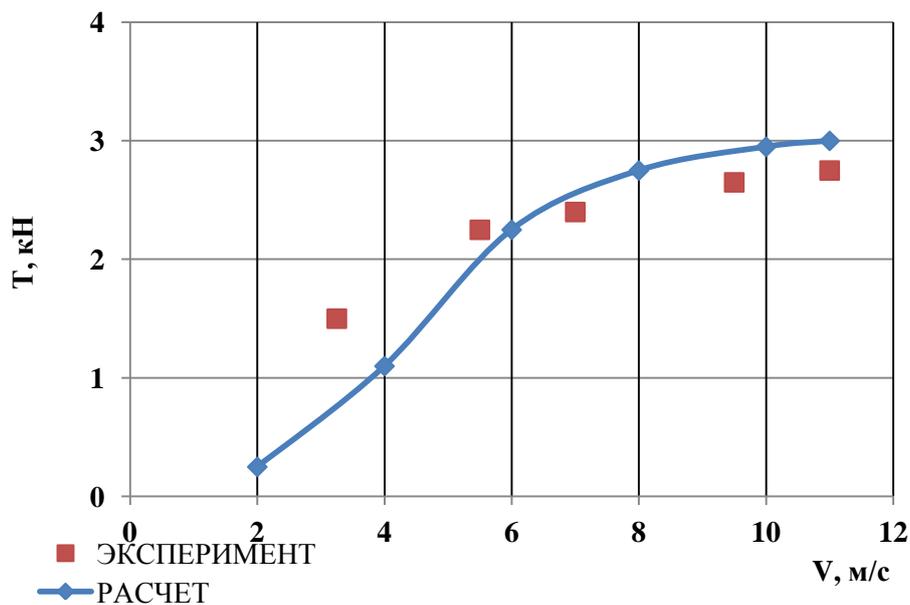


Рис. 5. Зависимость растягивающих усилий от скорости движения

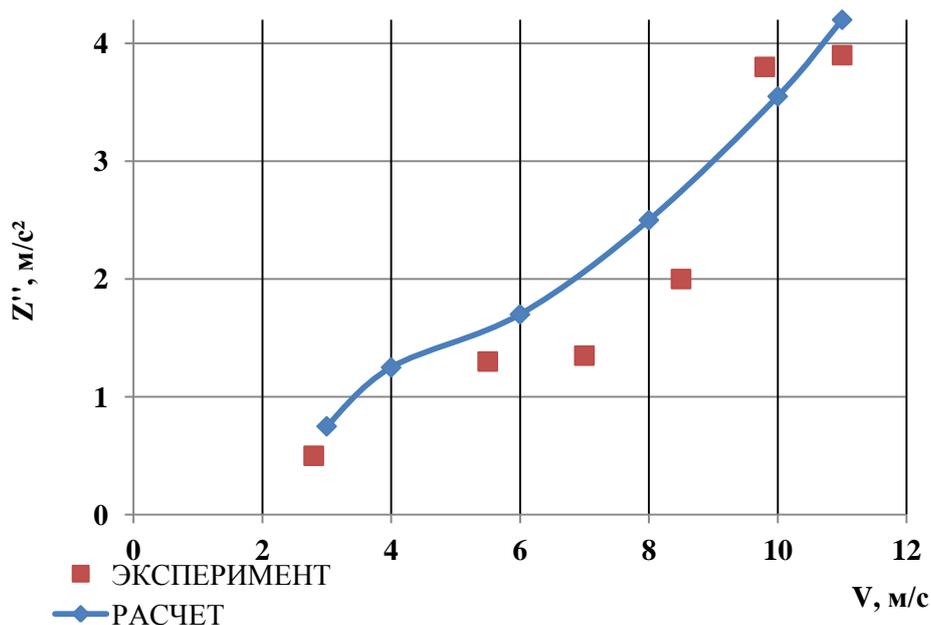


Рис. 6. Зависимость ускорений корпуса от скорости движения

Экспериментальные исследования машины в процессе движения по укатанным заснеженным дорогам показали, что опытный механизм натяжения гусеничных лент снижает динамические нагрузки в гусеничном движителе и трансмиссии, ускорения корпуса машины. Из записей процесса изменения растягивающих усилий отчетливо видно, что применение механизма натяжения, изменяющего длину гусеничного обвода в процессе движения, заметно снижает динамические нагрузки в гусенице. Обработка и анализ результатов испытаний показали, что применение опытного механизма натяжения снижает среднее квадратическое значение растягивающих усилий в гусенице не менее, чем на 25%. При проведении сравнительных испытаний по укатанным заснеженным дорогам было также установлено,

что использование разработанного механизма натяжения повышает устойчивость работы гусеничных лент, в особенности на высоких скоростях движения, снижает расход топлива в среднем на 4%.

Обработка результатов испытаний машины на снежной целине и их дальнейший анализ подтвердили вывод расчетно-теоретических исследований – снижение предварительного статического натяжения повышает проходимость. Во время испытаний дистанционно с места механика-водитель изменялась величина предварительного статического натяжения (T_c). В этом случае уместно провести аналогию механизма натяжения с системой регулирования давления воздуха в шинах полноприводных колесных автомобилей, которая позволяет легко устанавливать в условиях эксплуатации необходимую величину давления воздуха в шинах в зависимости от вида и состояния дорожно-грунтовой поверхности и этим повышать проходимость машины. Так, при значениях T_c до 3 кН машина преодолевала все участки местности с высотой снежного покрова от 600 до 900 мм (рис. 7).

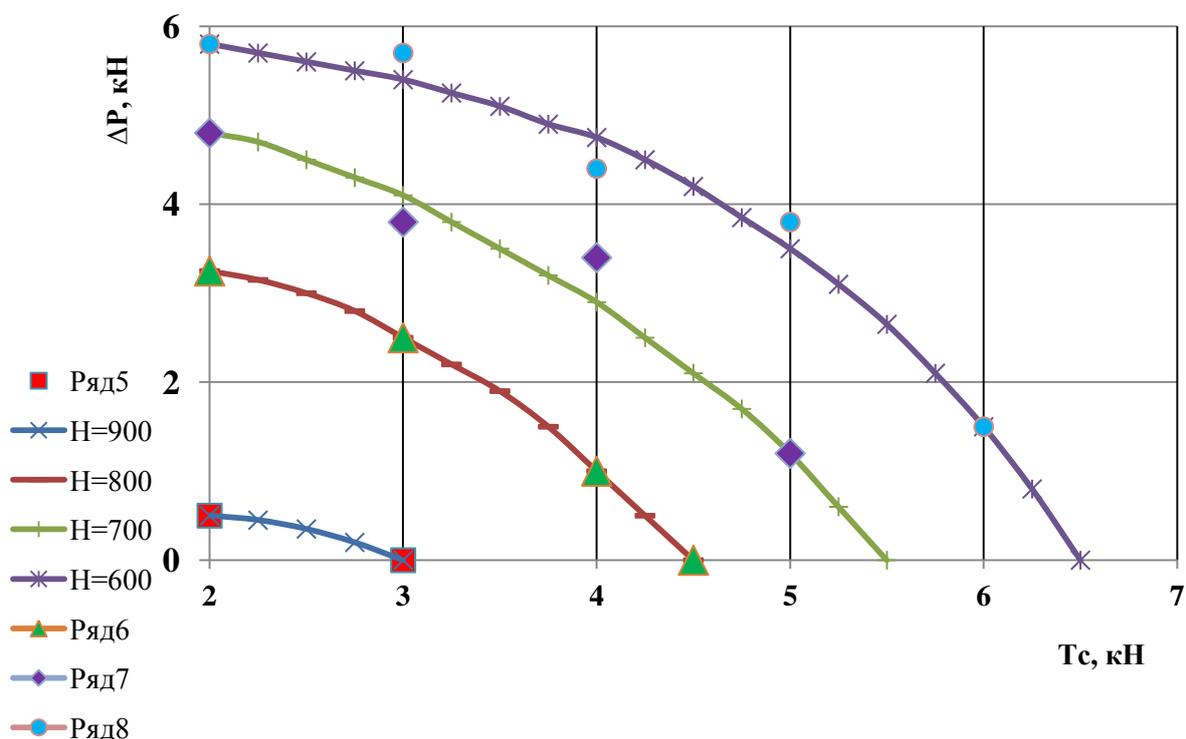


Рис. 7. Зависимости запаса силы тяги от предварительного статического натяжения

Увеличение T_c приводило к ухудшению проходимости машины, и при $T_c > 6$ кН машина не могла передвигаться по данным участкам местности (рис.7).

Таким образом, одним из резервов повышения проходимости машин по снегу является регулирование натяжения гусениц.

Выводы

1. Разработана математическая модель ходовой части. Создан алгоритм, программа и методика расчета.
2. Установлено влияние предварительного статического натяжения гусениц на проходимость машин по снегу.
3. Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказана целесообразность применения регулирования натяжения гусениц при движении машины по снежной целине и укатанным заснеженным дорогам.

Библиографический список

1. **Груздев, Н.И.** Танки [Текст] / Н.И. Груздев. – М.: Машгиз, 1944. – 482 с.
2. **Носов, Н.А.** Расчет и конструирование гусеничных машин [Текст] / Н.А. Носов. – М.: Машиностроение, 1972. 559с.
3. **Платонов, В.Ф.** Динамика и надежность гусеничного движителя [Текст] / В.Ф. Платонов. – М.: Машиностроение, 1973. – 232 с.
4. **Барахтанов, Л.В.** Повышение проходимости гусеничных машин по снегу [Текст] / Л.В. Барахтанов. – дисс. д. т. наук: 05.05.03. – Горький, 1988. – 352 с.