

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСПЫТАНИЙ К РАСЧЕТУ РЕСУРСА ХОДОВОЙ ЧАСТИ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

*А. А. Абызов, И.Я. Березин, О.С. Садаков*

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований нагруженности траков гусеничного движителя быстроходной машины в условиях реальной эксплуатации. На основе их анализа предложена модель взаимодействия траков с грунтом, отображающая особенности формы опорной поверхности, случайный характер внешних нагрузок и опирания, разработаны методики расчета напряжений в опасной точке и накопленного усталостного повреждения. Приведены результаты анализа влияния различных факторов на долговечность трака.

Для оценки характеристик надежности ответственных элементов движителей быстроходных гусеничных машин, предназначенных для эксплуатации в условиях бездорожья, находят применение методы, предусматривающие достаточно полный учет условий реальной эксплуатации, моделирование динамических процессов при многопараметрических случайных воздействиях, прогнозирование и управление надежностью модернизируемых и вновь проектируемых изделий [1,2]. Основным элементом рассматриваемого подхода является математическая модель транспортной машины, отображающая динамические процессы в связанной существенно нелинейной системе «силовая установка - поддрессоренный корпус - ходовая часть - случайная внешняя среда - водитель».

В качестве исходных данных для моделирования задаются динамические свойства исследуемой машины, в частности, весовые и геометрические параметры, упруго-вязкие характеристики системы поддрессирования и гусеничного движителя, типы и характеристики двигателя и трансмиссии и др. Типовые условия эксплуатации проектируемой машины в различных природно-климатических регионах задаются топографическими характеристиками местности, в частности, случайным макро- и микропрофилями трассы, дорожной кривизной, а также механическими характеристиками грунта (жесткость дорожного полотна, сопротивление прямолинейному движению и повороту, тягово-сцепные свойства и др.). Одним из элементов математической модели является подсистема, описывающая действия механика-водителя по выбору скорости движения машины по трассе в соответствии с изменяющимися дорожными условиями. В последующем процессы силового и кинематического воздействия используют в моделях формирования усталостных, износных и других видов отказов для прогнозирования количественных характеристик надежности ответственных элементов конструкций, таких, как функция вероятности безотказной работы, средняя наработка до отказа, гамма-процентный ресурс и др.

Предлагаемый подход иллюстрируется на примере оценки прочностной надежности траков гусеницы быстроходной машины. Поставленная задача является весьма актуальной, так как, несмотря на неоспоримые преимущества гусеничного движителя перед колесным по проходимости, он отличается низкой живучестью. При разрушении даже одного трака из общего числа звеньев, входящих в две гусеничные цепи, машина полностью теряет подвижность. Отметим, что при расчетах других элементов ходовой системы, не имеющих непосредственного контакта с грунтом (балансиры, опорные катки, торсионы и др.), внешнее кинематическое воздействие обычно задается в виде абсолютно жесткого случайного профиля дороги, что, очевидно, неприемлемо при исследованиях напряженности траков. Это иллюстрируется результатами проведенных натурных экспериментов, в ходе которых с помощью специальных измерительных устройств регистрировались процессы изменения во времени напряжений в наиболее нагруженных участках исследуемого трака при движении быстроходной гусеничной машины в различных дорожных условиях. В качестве примера на рис. 1 представлен фрагмент одной из осциллограмм. Анализ показывает, что наибольшие напряжения возникают в опорной ветви гусеничного обвода, а также при прохождении направляющего и ведущего колес; нагруженность траков в свободной ветви пренебрежимо мала. В опорной ветви наибольшие импульсы напряжений возникают при

нагружении исследуемого трака опорными катками, причем величина и даже знак этих напряжений при каждом нагружении изменяются случайно.

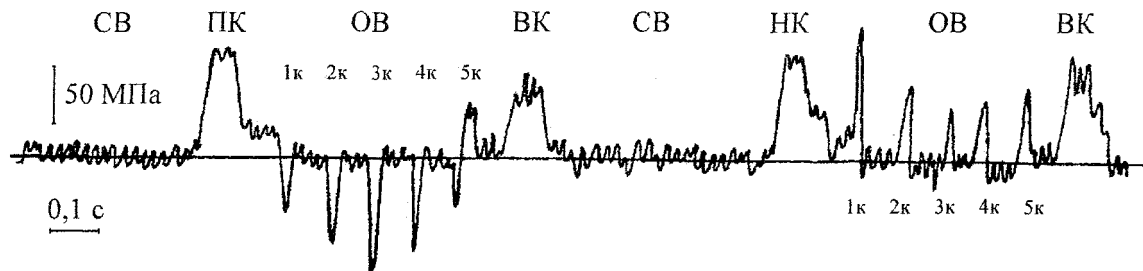


Рис. 1. Фрагмент процесса изменения напряжений в опасной зоне трака:  
НК – зона направляющего колеса, ВК – ведущего колеса,  
ОВ – опорной ветви, СВ – свободной ветви

Очевидно, отмеченное объясняется двумя основными причинами: изменением катковой нагрузки вследствие колебаний корпуса машины и тем, что исследуемый трак при каждом прохождении гусеничного обвода взаимодействует с новым участком грунта и, следовательно, создается новая схема его опирания. Как показывает опыт эксплуатации быстроходных гусеничных машин, жесткость грунтов оказывает определяющее влияние на ресурс траков. На рис. 2 приведены диаграммы, полученные на основе обработки результатов экспериментов, из которых следует, что наибольшее удельное усталостное повреждение приходится на опорную ветвь гусеницы, особенно при движении по жесткому основанию (дороги с мерзлым грунтом, каменистые дороги и т.п.).

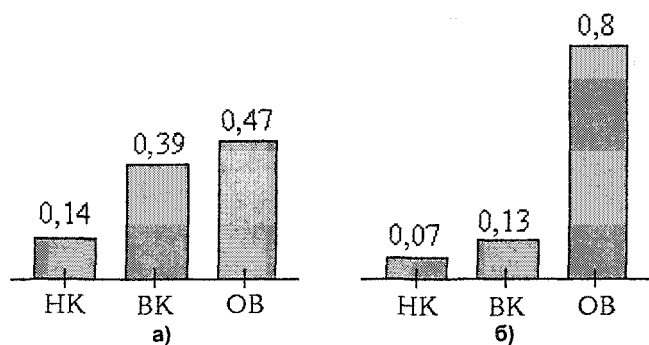


Рис. 2. Относительная доля усталостного повреждения, накапливаемого в различных зонах обвода:  
а – летняя трасса;  
б – зимняя трасса

Решение задачи о прогнозировании ресурса траков гусениц включает четыре последовательных этапа. На первом с помощью математической модели транспортной машины [1] исследуется движение машины по типовой трассе в заданном регионе; при этом грунт принимается абсолютно жестким. В результате получают непрерывный случайный процесс изменения Катковых нагрузок, который в последующем преобразуют в случайный импульсный поток сил, действующих на траки со стороны опорных катков, а также со стороны ведущего и направляющего колес. На втором этапе моделируется взаимодействие траков с грунтом и элементами движителя (опорными катками, соседними траками, ведущим и направляющим колесами). В отличие от предыдущего, на этом этапе грунт рассматривается как случайная податливая среда.

Рассмотрим нагрузки, действующие на трак в опорной ветви. Это сила со стороны опорного катка  $P_{кат}$ , растягивающее усилие со стороны соседних траков  $F_{ГУС}$  и случайные реакции грунта  $R_i$  (рис. 3). В процессе движения машины указанные силы непрерывно изменяются, так как по траку, лежащему на грунте, последовательно прокатываются опорные катки машины, а также изменяется растягивающее усилие в опорной ветви. Подобно нагруженности трака в опорной ветви, в зонах ведущего и направляющего колес на него действуют усилия со стороны смежных траков  $F_{ГУС}$  и сосредоточенные силы  $P_{ВК}$  и  $P_{НК}$ , при-

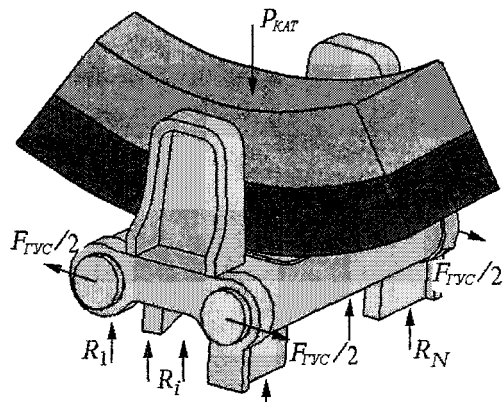


Рис. 3. Нагрузки, действующие на трак в опорной ветви (показан фрагмент опорного катка с резиновой шиной)

ложенные к беговой дорожке. Отметим, что случайные процессы изменения внешних усилий  $P_{КАТ}$ ,  $F_{ГУС}$ ,  $P_{БК}$  и  $P_{НК}$  определяются на первом этапе при моделировании движения гусеничной машины по местности.

Для определения случайных реакций  $R_i$  необходимо использовать модель взаимодействия трака с грунтом, отображающую его жесткость, форму опорной поверхности траков, в частности, расположение и размеры грунтозацепов, а также случайный характер опирания. В работе [3] предложен один из вариантов такой модели в виде Винклеровского полупространства, в котором дискретные упругие элементы распределены по глубине по некоторому случайному закону (рис. 4). В этой модели жесткости упругих элементов принимают равными  $c_i = c \cdot s_i$ , где  $c_i$  - жесткость упругого элемента, взаимодействующего с  $i$ -й площадкой опорной поверхности трака;  $c = \text{const}$  - коэффициент постели для данного грунта [ $\text{Н/м}^2$ ],  $s$  - площадь  $i$ -го участка опорной поверхности трака ( $i=1...K$ ). Координаты упругих элементов  $\xi_i$  и  $\eta_i$  на плоскости грунта зафиксированы, а вероятностные свойства отображаются случайными значениями  $\zeta_i$ , задающими положение свободных концов упругих элементов. В соответствии с принятыми допущениями криволинейная форма опорной поверхности трака заменяется совокупностью плоских участков с площадями  $s_i$  и координатами центра  $x_i, y_i, z_i$ . Под действием катковой нагрузки происходит «погружение» трака в дискретную упругую среду, которое сопровождается образованием точечных контактов опорной поверхности с упругими элементами и, вследствие деформации последних, возникновением реакций, случайных по величине и точкам контакта. Реакции грунта определяются из условий равновесия; при этом трак рассматривается как недеформируемое тело. В исходном состоянии связанная с траком подвижная система координат  $xuz$  совпадает с неподвижной системой  $\xi\eta\zeta$ . Перемещение трака в грунте описывается вертикальным перемещением  $\Delta$  и поворотом  $\alpha$  и  $\beta$  относительно осей  $\eta$  и  $\xi$ .

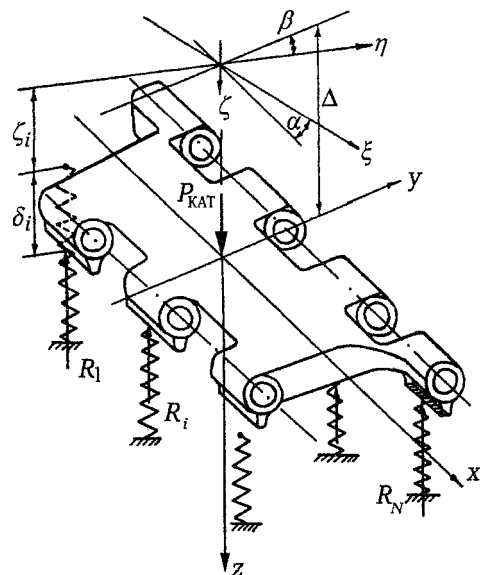


Рис. 4. Модель взаимодействия трака с грунтом (катковая нагрузка условно приложена непосредственно к траку)

Под действием случайной катковой нагрузки  $P_{КАТ}$  происходит деформация случайно расположенных в грунте упругих элементов  $\delta_i$ , которая сопровождается возникновением случайных реакций  $R_i$ :

$$\delta_i = \Delta + z_i - \zeta_i + x_i\alpha + y_i\beta,$$

$$R_i = \begin{cases} c_i\delta, & \text{при } \delta_i > 0; \\ 0, & \text{при } \delta_i \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Задача нахождения случайных ансамблей реакций сводится к поиску положения трака в грунте, удовлетворяющему условиям равновесия, которые вследствие односторонних связей упругих элементов с поверхностью трака выражаются системой существенно нелинейных уравнений относительно  $\Delta$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\sum_{i=1}^{N(\Delta, \alpha, \beta)} R_i + P_{КАТ} = 0,$$

$$\sum_{i=1}^{N(\Delta, \alpha, \beta)} R_i x_i = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N(\Delta, \alpha, \beta)} R_i y_i = 0,$$

где  $N(\Delta, \alpha, \beta)$  - число реакций, уравнивающих трак в дискретной упругой среде. Решение системы уравнений (2) осуществляется численно. Координаты, определяющие положение упругих элементов  $\zeta_i$  в каждом независимом испытании (погружении трака в грунт), задаются с помощью генератора случайных величин, воспроизводящего принятый закон распределения.

Идентификация модели грунта (определение величины коэффициентов постели для различных типов дорог и закона распределения координат  $\zeta_i$ ) выполнена на основе сопоставления расчетных и экспериментальных законов распределения напряжений в опасной точке трака при движении по различным трассам. Величины коэффициентов постели для различных дорог приведены в табл. 1; закон распределения координат  $\zeta_i$  по результатам идентификации принят в виде закона равной плотности в интервале 0...25 мм.

Таблица 1

Величины коэффициентов постели для различных дорог

Вид трассы	Коэффициент постели $c$ , МН/м <sup>3</sup>
Снежная целина, заснеженная зимняя дорога, пылевая дорога, песчаная местность	5,0...15
Заснеженная накатанная дорога, целина, лесная дорога, грунтовая дорога в распутицу	15...25
Твердая грунтовая дорога, насыпная дорога на твердом основании, щебенчатая дорога	25...35
Зимняя бесснежная дорога с колеями, мерзлый грунт, булыжное шоссе, каменная дорога	35...50

Число точек, в которых трак соприкасается с упругими элементами, зависит от геометрии опорной поверхности и жесткости грунта. Очевидно, что при увеличении жесткости грунта число точек будет уменьшаться; соответствующая зависимость представлена на рис. 5.

Таким образом, описанная модель взаимодействия траков с грунтом позволяет получить совокупность случайных реакций  $R_i$ , соответствующую каждому нагружению трака опорным катком.

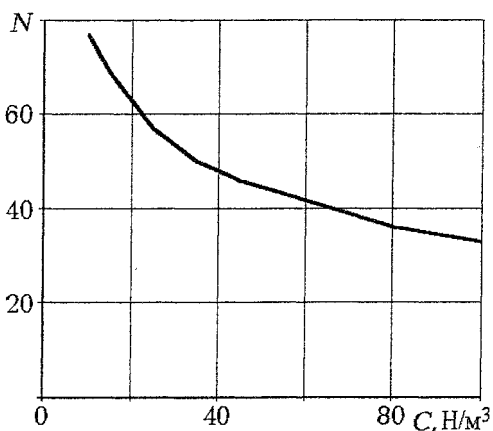


Рис. 5. Зависимость числа точек контакта трака с грунтом от жесткости грунта

На *третьем* этапе выполняют расчет значений импульсов напряжений в исследуемой зоне трака, возникающих при действии ансамблей случайных реакций в опорной ветви обвода [4]. Рассмотрим один из способов решения этой задачи, основанный на предположении, что тело трака работает как линейно-упругая система. Поскольку в исследуемой точке детали с номером "k" в общем случае реализуется объемное напряженное состояние, расчеты необходимо выполнять для всех компонентов тензора напряжений. В дальнейшем методика расчета иллюстрируется на

примере одного компонента, обозначаемого  $\sigma_{OB}^k$ .

Используя принцип суперпозиции, напряжение в рассматриваемой точке конструкции можно представить в виде суммы произведений нагрузок на соответствующие коэффициенты влияния, равные напряжениям, возникающим под действием соответствующих единичных сил:

$$\sigma_{OB}^k = [R_i]^T [\omega_{ei}^k] + P_{КАТ} \omega_{КАТ}^k + F_{ГУС} \omega_{ГУС}^k, \tag{3}$$

где  $[R_i]$  - столбец сил, действующих на опорную поверхность трака со стороны грунта,  $[\omega_{ei}^k]$  - столбец соответствующих коэффициентов влияния для k-й исследуемой точки;  $\omega_{КАТ}^k$ ,  $\omega_{ГУС}^k$  - коэффициенты влияния от действия силы со стороны опорного катка и растягивающей силы со стороны резинометаллических шарниров;  $P_{КАТ}$  - сила со стороны опорного катка;  $F_{ГУС}$  - растягивающее усилие со стороны резинометаллических шарниров.

Величина импульса напряжений  $\sigma_{HK}^k$ , возникающего в траке при прохождении направляющего колеса, пропорциональна усилию в свободной ветви  $F_{CB}$ , а импульса напряжений  $\sigma_{BK}^k$ , возникающего при прохождении ведущего колеса - натяжению рабочей ветви  $F_{PB}$ :

$$\sigma_{HK}^k = \omega_{HK}^k F_{CB}, \quad (4)$$

$$\sigma_{BK}^k = \omega_{BK}^k F_{PB}, \quad (5)$$

где  $\omega_{HK}^k$ ,  $\omega_{BK}^k$  – соответствующие коэффициенты влияния. Выражения, аналогичные (3)-(5), могут быть записаны для каждого компонента тензора напряжений в рассматриваемой точке.

Каждый из коэффициентов  $\omega_{zi}^k$  равен напряжению, возникающему в  $k$ -й точке трака от действия единственной силы  $R_i=1$ . Однако, определить  $\omega_{zi}^k$ , нагружая трак только одной силой  $R_i=1$ , практически невозможно, так как в этом случае не будут выполняться условия равновесия трака. В соответствии с одним из методов определения коэффициентов влияния трак, закрепленный в трех произвольно выбранных точках, последовательно нагружают единичной силой, приложенной в точках предполагаемого опирания на грунт; напряжения в исследуемой точке рассчитывают, используя стандартные пакеты программ метода конечных элементов (МКЭ). Полученные в результате расчета напряжения и являются коэффициентами влияния  $\omega_{zi}^k$ . Аналогично определяют коэффициент влияния со стороны опорного катка  $\omega_{КАТ}^k$ . В дальнейшем при нагружении трака системой самоуравновешенных сил реакции в дополнительных опорах будут равны нулю, поэтому их наличие не влияет на результат. Проверка данного метода показала его эффективность при практическом использовании.

Коэффициент влияния от действия растягивающей силы в гусеничной ленте  $\omega_{ГУС}^k$  может быть определен непосредственно при нагружении трака самоуравновешенными единичными растягивающими силами. Коэффициенты  $\omega_{HK}^k$ ,  $\omega_{BK}^k$  также рассчитывают с помощью МКЭ при нагружении трака единичными силами со стороны шарниров; при этом направление нагрузок и условия опирания трака должны соответствовать условиям, возникающим при прохождении направляющего и ведущего колес.

Таким образом, на этом этапе в результате расчетов по описанной методике получают массив значений компонентов тензора напряжений в исследуемой точке трака при каждом «наезде» на него опорного катка машины, а также при прохождении ведущего и направляющего колес.

На *четвертом*, заключительном этапе решения задачи выполняют оценку долговечности траков по критерию усталостного разрушения. Исследования показали, что в процессе каждого нагружения компоненты тензора напряжений в рассматриваемой точке изменяются пропорционально, и, следовательно, положение главных площадок остается неизменным. Для такого вида нагружения в работах [5, 6] предложен метод расчетной оценки усталостной долговечности, в соответствии с которым рассматривается накопление повреждений в различных наклонных площадках в окрестности опасной точки. Предполагается, что накопление повреждений в площадках происходит независимо, в соответствии с гипотезой линейного суммирования, и определяется касательными напряжениями, а разрушение происходит по площадке, накопившей наибольшее усталостное повреждение. Вводится понятие удельного усталостного повреждения  $v_k^j$ , равного доле полного разрушения, накапливаемого в  $k$ -й точке за один километр пробега по участку трассы с  $j$ -м типовым микропрофилем. Последующий анализ величин удельных повреждений позволяет выделить наиболее опасную точку, определяющую усталостную долговечность трака. При движении по трассе, содержащей участки с микропрофилями различных типов, средняя усталостная долговечность трака, выраженная в числе километров пробега до момента образования усталостной трещины, определяется следующим выражением:

$$L_{cp} = \left[ \sum_{j=1}^M v_j \psi_j \right]^{-1}, \quad (6)$$

где  $v_j$  - доля полного разрушения, накапливаемого за один километр пробега по участку трассы с  $j$ -м типовым микропрофилем,  $\psi_j$  - относительная протяженность участков с таким микропрофи-

лем для исследуемого полигона,  $M$  - общее число типовых микропрофилей. Для реализации предложенной методики разработан пакет вычислительных программ

Рассмотрим результаты применения методики для прогнозирования долговечности траков гусениц снегоболотоходной машины ТМ-1. Оценка долговечности выполнялась для варианта машины, оснащенной гусеницами с траками из легированной стали 20ХГСНМ. С учетом конструктивно-технологических особенностей траков в расчетах использованы следующие усталостные характеристики детали: математическое ожидание предела выносливости  $\sigma_{-1} = 165$  МПа; коэффициент вариации предела выносливости  $\nu_{\sigma_{-1}} = 0,1$ ; показатель наклона кривой выносливости  $m = 7$ ; базовое число циклов  $N_0 = 2 \cdot 10^6$ . Для расчета коэффициентов влияния использовался пакет программ МКЭ Ansys. Конечноэлементная модель трака представлена на рис. 6, а; картина напряженного состояния при нагружении трака единичной силой со стороны опорной поверхности - на рис. 6, б. Как показал анализ результатов предварительных расчетов, наиболее нагруженными являются зоны галтельных переходов ребер трака. В этих зонах были выбраны наиболее нагруженные точки, для которых выполнялись расчеты накопленного повреждения.

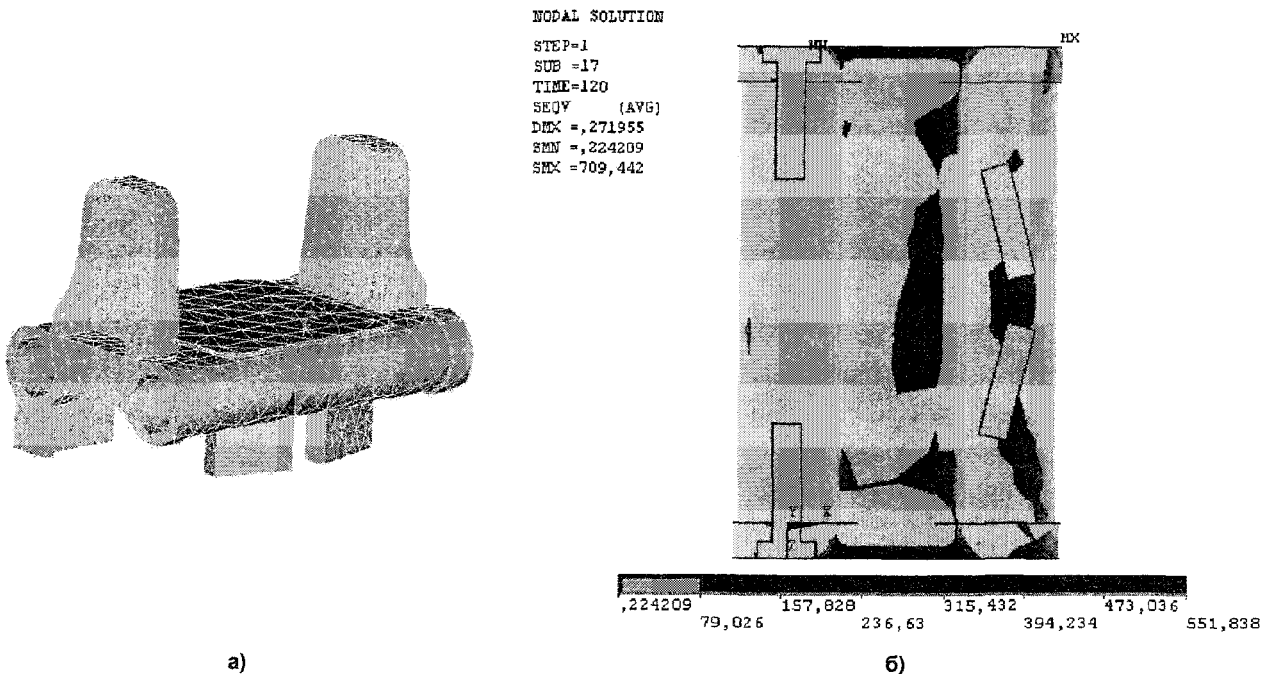


Рис. 6. Моделирование напряженного состояния:  
а – модель трака; б – картина напряженного состояния

Нагрузка со стороны опорного катка передается на трак через податливую резиновую шину; при этом площадь контакта зависит от нагрузки. В связи с отмеченной особенностью при расчете

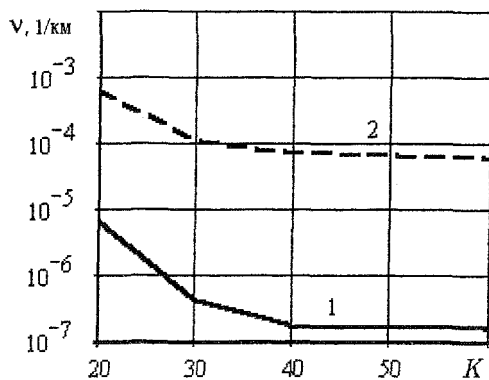


Рис. 7. Зависимость удельного накопленного повреждения от предполагаемого числа точек контакта: 1 –  $c=20$  МН/м<sup>2</sup>; 2 –  $c=50$  МН/м<sup>2</sup>

соответствующего коэффициента влияния была дополнительно введена модель опорного катка, имеющая внутреннюю металлическую часть, к которой прикладывалась нагрузка, и податливую резиновую шину (см. рис. 3). Аналогично для определения коэффициента влияния от растягивающей нагрузки, действующей в гусеничной ленте, использовалась модель трака с пальцами и резиновыми элементами шарниров; растягивающая нагрузка прикладывалась к пальцам.

При практическом использовании предлагаемой методики необходимо решить ряд методических вопросов, в частности, определить оптимальное с точки зрения точности и трудоемкости расчетов число  $K$  точек предполагаемого опирания. На рис. 7 приведена зависимость от  $K$  накоп-

ленного повреждения, приходящегося на 1 километр пробега для двух вариантов трассы - с «мягким» и «жестким» грунтом. Анализ результатов показывает, что при  $K=40$  накопленное повреждение стабилизируется.

Расчеты долговечности трака выполнялись для трассы, имеющей участки с различными микропрофилями (табл. 2). Участки с микропрофилем I типа являются самыми легкими и допускают наибольшую скорость движения, V типа - самые тяжелые. Схема разбиения трассы полигона на участки с различными типами микропрофиля представлена в табл. 3.

Таблица 2

Характеристики типовых микропрофилей участков трасс

Тип микропрофиля	Средняя высота неровностей, см	Средняя длина неровностей, м	СКО микропрофиля, см
I	1,7	4,8	0,73
II	7,4	10,1	2,04
III	12,4	12,2	5,44
IV	18,6	12,9	11,94
V	31,7	15,8	17,62

Таблица 3

Схема трассы полигона

№ участка	Тип микропрофиля	Протяженность участка, км	№ участка	Тип микропрофиля	Протяженность участка, км
1	III	1,4	8	II	0,8
2	II	0,9	9	IV	1,5
3	V	0,9	10	III	0,6
4	II	0,3	11	V	0,5
5	IV	0,8	12	IV	0,6
6	III	1	13	III	0,4
7	IV	1,1	14	V	0,2

Относительная протяженность участков с микропрофилями различных типов, скорость движения по этим участкам и доля усталостного повреждения, приходящегося на 1 км пробега, приведены в табл. 4. Рассматривался случай движения по жесткой трассе (каменистая местность, мерзлый грунт; коэффициент постели равен  $40 \text{ Н/м}^3$ ), когда происходит наибольшее накопление усталостного повреждения.

Таблица 4

Характеристика трассы полигона

Тип микропрофиля	Относительная протяженность участка	Скорость движения, м/с	Доля повреждения, накапливаемого на 1 км пробега, $v_f$
II	0,182	11	$2,814 \cdot 10^{-5}$
III	0,309	8	$4,048 \cdot 10^{-5}$
IV	0,364	7	$5,262 \cdot 10^{-5}$
V	0,145	6	$9,024 \cdot 10^{-5}$

В процессе расчетов были проведены исследования, направленные на выявление влияния различных факторов на долговечность трака. При увеличении скорости движения машины по трассе усиливаются колебания корпуса, что приводит к увеличению нагрузок на опорные катки и, следовательно, к увеличению накопленного повреждения. Результаты расчетов для трасс с микропрофилем III типа приведены на рис. 8. Увеличение жесткости грунта приводит к увеличению повреждения, накопленного на километр пробега (рис. 9). Очевидно, это объясняется уменьшением числа точек опирания трака. К такому же результату приводит увеличение высоты грунтозацепов (рис. 10).

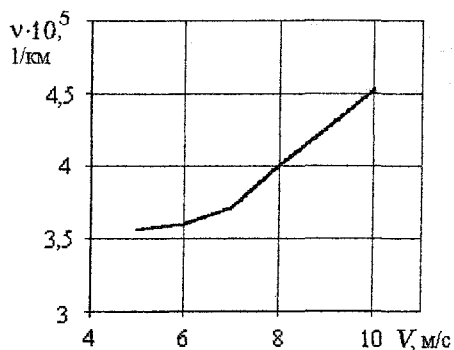


Рис. 8. Влияние скорости движения по трассе с микропрофилем III типа на удельное накопленное повреждение

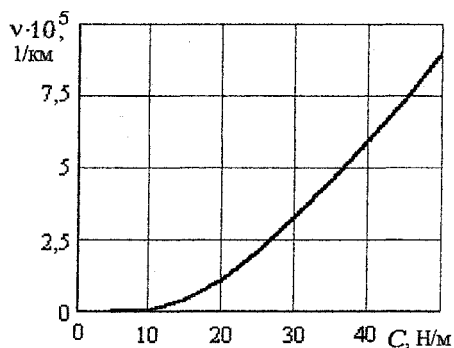


Рис. 9. Влияние жесткости дорожного полотна на величину удельного накопленного повреждения

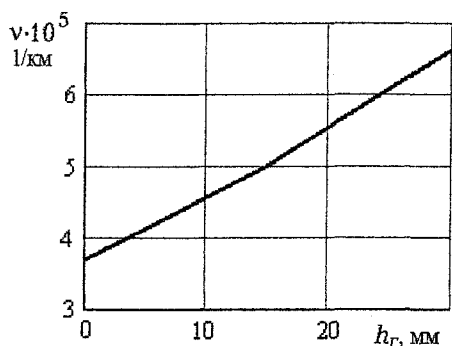


Рис. 10. Влияние высоты грунтозацепов на удельное накопленное повреждение

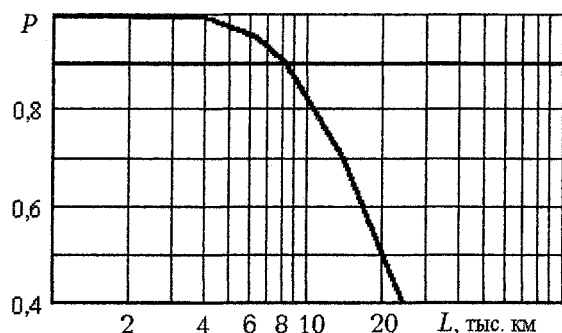


Рис. 11. Функция надежности трака при движении по трассе

Средняя расчетная долговечность трака при движении машины в условиях, аналогичных рассматриваемому полигону, равна 20 тыс. км. На рис. 11 представлена функция надежности, соответствующая моменту зарождения усталостных микротрещин на поверхности траков; стадия живучести в расчетах не рассматривалась. Гамма-процентный ресурс ( $\gamma=0,9$ ) равен 8 тыс. км. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными массовой эксплуатации.

#### Литература

1. Березин И.Я., Абызов А. А. Концепция и методы имитационных ресурсных испытаний мобильной техники (сообщение первое, второе) // *Динамика, прочность и износостойкость машин. Международный журнал на электронных носителях.* - 1996. - №2. - С. 61-68. - № 3. - С. 75-82.
2. Березин И.Я., Абызов А.А. Моделирование процесса эксплуатации при имитационных ресурсных испытаниях мобильной техники // *Техника и технологии строительства и эксплуатации автомобильных дорог: сб. науч. тр. МАДИ.* - М.: МАДИ, 2000. - С. 56-74.
3. Березин И.Я., Колодкин В.А. Стохастическое моделирование взаимодействия гусеницы с грунтом // *Динамика и прочность конструкций: труды ЧПИ.* - Челябинск: ЧПИ, 1977. - Вып. 201. - С. 112-116.
4. Березин И.Я., Садаков О.С., Колодкин В.А. К вопросу определения спектров напряжений в деталях сложной формы при случайном погружении // *Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузках: труды ЧПИ* - Челябинск: ЧПИ, 1979. - Вып. 236. - С. 107-111.
5. Сергеев ВТ., Березин И.Я. К расчету ресурса деталей, работающих в условиях нерегулярного нагружения и плоского напряженного состояния // *Машиноведение, 1980.* - № 4. - С. 67-73.
6. Гусев А.С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. - М.: Машиностроение, 1989. - 248 с.