

Важнейшей характеристикой, определяющей эффективность быстроходной гусеничной машины (БГМ), как и любого другого транспортного средства, является скорость движения, которая оказывает значительное влияние на динамические нагрузки силовой цепи машины при заданных дорожно-грунтовых условиях.

Скорость движения БГМ зависит от ее технических характеристик, внешних условий движения и квалификации водителя. Водитель в каждый момент времени стремится управлять машиной так, чтобы добиться максимальной скорости в данных условиях движения. Однако, несмотря на важную роль опыта водителя, в каждом конкретном случае существует верхняя не зависящая от водителя граница скорости, которая определяется техническими возможностями машины и внешними условиями движения. Эту скорость, являющуюся реальной скоростью машины в данных условиях при идеальном безошибочном управлении водителем, называют технической скоростью движения машины [1].

Техническая средняя скорость движения в конкретных условиях дает возможность оценить потенциальные скоростные способности машины в данных условиях, а следовательно, и ее техническое совершенство как транспортного средства.

Средняя скорость движения БГМ по трассе определяется по формуле:

$$V_{cp} = \frac{S_{\Sigma}}{T_{\Sigma}},$$

где S_{Σ} – суммарный путь, пройденный машиной; T_{Σ} – общее время, затраченное на движение по трассе, которое является суммой отрезков времени t_i движения машины со скоростью V_i . Если принять, что S_i – путь, пройденный машиной со скоростью V_i , тогда выражение для средней скорости примет вид:

$$V_{\text{cp}} = \frac{S_{\Sigma}}{\sum_i \frac{S_i}{V_i}}.$$

Разделим числитель и знаменатель полученного выражения на S_{Σ} , и учитывая, что $S_i / S_{\Sigma} = p_{si}(V)$ – вероятность движения со скоростью V_i по пути, запишем:

$$V_{\text{cp}} = \frac{1}{\sum_i \frac{p_{si}(V)}{V_i}}.$$

Переходя к непрерывным функциям через интегральную сумму в окрестности V_i , получим

$$p_{si}(V) = d\Phi_s(V) = \varphi_s(V) dV,$$

где $\Phi_s(V)$ – функция распределения скорости по пути, $\varphi_s(V)$ – плотность распределения скорости по пути.

Переходя от суммы к интегралу с пределами от 0 до V_{max} , выражение для средней технической скорости примет вид:

$$V_{\text{cp}} = \frac{1}{\int_0^{V_{\text{max}}} \frac{\varphi_s(V)}{V} dV}. \quad (1)$$

Как показывает опыт эксплуатации БГМ, их скорости при прямолинейном движении по неровностям в основном ограничиваются качеством системы поддрессоривания. При плохой системе поддрессоривания, вследствие жестких ударов балансиров катков в упоры, возникают вертикальные ускорения (более 3,5g [2]),

заставляющие водителя снижать скорость. При отсутствии таких ударов, называемых «пробоями» подвески, вертикальные ускорения обычно находятся в допустимых пределах. Поэтому основной характеристикой, оценивающей систему поддресоривания по влиянию на среднюю скорость БГМ, должна быть зависимость, отражающая возможность движения машины без «пробоев» подвески.

В качестве такой характеристики принимают скоростную характеристику системы поддресоривания – кривую, отражающую зависимость от скорости максимальной высоты неровностей, которые БГМ может преодолевать без «пробоев» подвески при самых неблагоприятных условиях движения по неровностям с гармоническим профилем [2]. Форма и, главным образом, высота расположения скоростной характеристики в координатах h и V определяет степень влияния системы поддресоривания на среднюю скорость БГМ. Иными словами, чем больше высота неровностей, которые БГМ преодолевает без «пробоев» во всем диапазоне скоростей, тем меньше система поддресоривания влияет на снижение средней скорости.

Покажем связь между средней скоростью движения БГМ и высотой «проходной» периодической неровности – высота периодических неровностей, которые БГМ может преодолевать без «пробоев» подвески или по ограничению предельных ускорений на месте водителя во всем скоростном диапазоне движения. Для этого представим скоростную характеристику системы поддресоривания БГМ в упрощенном виде (рис. 1), как это рекомендуется в [2]. Здесь на участке $V \leq V_0$ скоростная характеристика бесконечно возрастает, так как на низких скоростях (менее 10 км/ч) быстроходность гусеничной машины не ограничивается системой поддресоривания, а определяется только тягово-сцепными свойствами. На участке $V_0 \leq V \leq V_{\max}$ скоростная характеристика параллельна оси абсцисс и находится на высоте «проходной» периодической неровности h_1 минимальной на всем скоростном диапазоне. Если

реальная скоростная характеристика будет располагаться выше упрощенной, то влияние реальной системы поддрессоривания на среднюю скорость БГМ будет меньше, чем влияние системы поддрессоривания с упрощенной скоростной характеристикой.

При принятой скоростной характеристике функция быстроходности БГМ по системе поддрессоривания имеет вид, показанный на рис. 2 [2], где $\Phi_s(h_1)$ – вероятность встречи неровностей, высотой менее или равной h_1 . Например, на рис. 3 представлена функция распределения высот неровностей по пути для грунтовых дорог наезженных БГМ в средней полосе Европейской части России [2].

Известно, что функция быстроходности (вероятность того, что скорость движения будет больше заданной) при прямолинейном движении БГМ по неровностям, вследствие предположения о независимости ограничений скорости движения по плавности хода и по тяговым свойствам, определяется следующим образом [1]:

$$F_s(V) = F_{сп}(V) \cdot F_{ст}(V),$$

где $F_{сп}(V)$ – функция быстроходности по системе поддрессоривания, $F_{ст}(V)$ – функция быстроходности по тяговым свойствам.

Так как $F_{сп}(V) = 1 - \Phi_s(V)$ и $dF_s(V)/dV = -d\Phi_s(V)/dV = -\varphi_s(V)$ [1], плотность распределения скорости по пути будет:

$$\varphi_s(V) = \varphi_{сп}(V) \cdot F_{ст}(V) + \varphi_{ст}(V) \cdot F_{сп}(V).$$

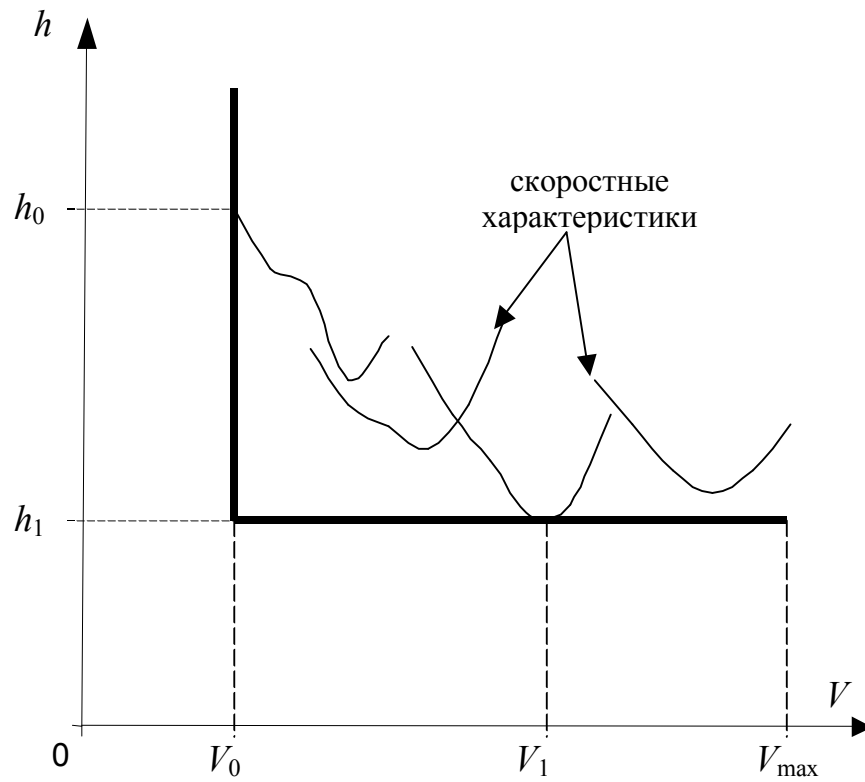


Рис. 1. Упрощенная скоростная характеристика

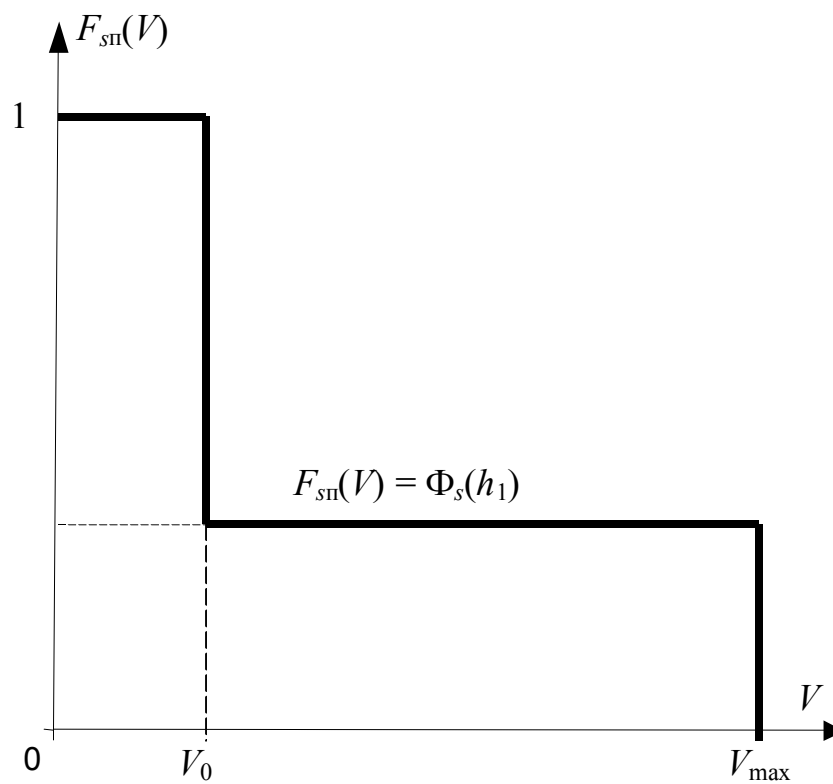


Рис. 2. Функция быстроходности по системе подрессоривания, соответствующая упрощенной скоростной характеристике рис. 1.

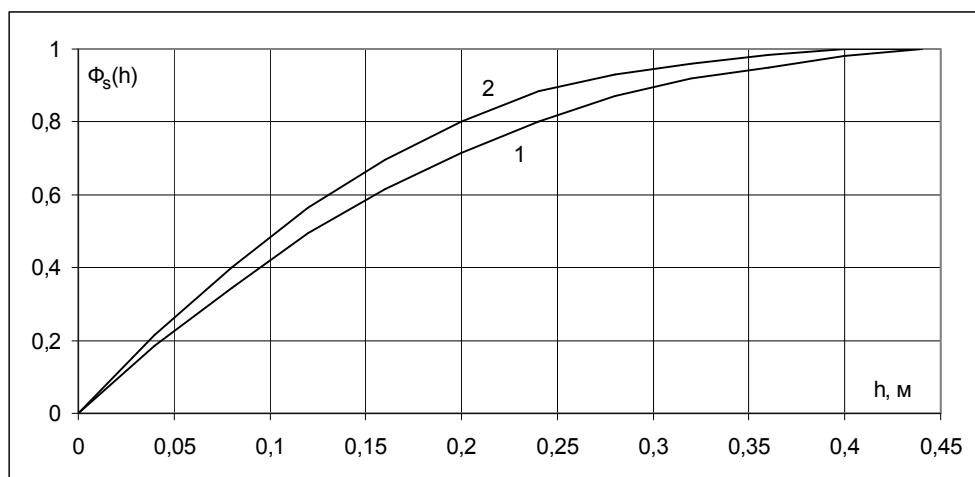


Рис. 3 Функции распределения вероятностей высоты неровностей по пути. 1 – трассы гусеничных машин; 2 – грунтовые дороги

Опуская промежуточные выкладки, в итоге получим выражение для средней технической скорости движения БГМ по неровностям [2]:

$$V_{\text{ср.п}} = \frac{1}{[1 - \Phi_s(h_1)] \frac{1}{V_0} + \Phi_s(h_1) \frac{1}{V_{\text{ср.т}}}}, \quad (2)$$

В [2] авторы называют эту скорость – средней скоростью, вычисленной с учетом ограничений по системе поддрессоривания, и вводят безразмерный коэффициент качества системы поддрессоривания

$$K_{\text{п}} = \frac{V_{\text{ср.п}}}{V_{\text{ср.т}}} = \frac{1}{[1 - \Phi_s(h_1)] \frac{V_{\text{ср.т}}}{V_0} + \Phi_s(h_1)} \leq 1$$

Вычисленная таким образом, средняя скорость по системе поддрессоривания не может быть больше средней скорости по тяговым свойствам. В случае, если даже БГМ будет преодолевать все неровности без ограничения по плавности хода, то $\Phi_s(h_1)=1$, $K_{\text{п}}=1$. То есть для машин со «слабыми» тяговыми свойствами, посредственная система

подрессоривания позволит получить высокий K_n . В то же время для энергооснащенных машин добиться высоких K_n практически невозможно.

Используемое понятие коэффициента качества системы подрессоривания не позволяет сравнивать технический уровень подвесок для машин с разной удельной мощностью. Вычисленная по формуле (2) $V_{ср.п}$ фактически является средней скоростью прямолинейного движения БГМ, то есть как с учетом тяговых свойств, так и ограничений по плавности хода и не подходит для определения направлений модернизации БГМ.

Если принять, что $V_{ср.п}$ – средняя скорость, определяемая только ограничениями по системе подрессоривания, то есть при отсутствии тяговых ограничений, в (2) надо вместо $V_{ср.т}$ подставить V_{max} – максимальную скорость движения машины. Тогда выражение для $V_{ср.п}$ примет вид:

$$V_{ср.п} = \frac{1}{[1 - \Phi_s(h_1)] \frac{1}{V_0} + \Phi_s(h_1) \frac{1}{V_{max}}} . \quad (3)$$

Теперь коэффициент качества системы подрессоривания, для машин со «слабым» двигателем и «хорошей» подвеской, будет принимать значения более единицы. Полное соответствие между тяговыми свойствами и качеством системы подрессоривания достигается при $K_n=1$. Такая трактовка K_n позволяет определить пути модернизации БГМ.

Реальная скоростная характеристика системы подрессоривания существенно отличается от аппроксимированной ступенчатой характеристики и имеет явно выраженный участок плавного возрастания. Представим упрощенную скоростную характеристику в виде, показанном на рис. 4. Здесь на участке $V \leq V_0$ скоростная характеристика также бесконечно возрастает. На участке $V_0 \leq V \leq V_1$ реальная скоростная характеристика заменяется гиперболой с асимптотами $V = V_0$ и $h = h_1$. На

участке $V_1 \leq V \leq V_{\max}$ скоростная характеристика параллельна оси абсцисс и находится на высоте «проходной» периодической неровности h_1 . Такая скоростная характеристика, в отличие от характеристики, представленной на рис. 1, позволяет учесть скорости движения, попадающие в заштрихованную область (рис. 4). Это представление позволяет получить более достоверную оценку средней скорости при ограничениях режимов движения по системе поддрессирования, что особо важно при определении нагруженности и долговечности элементов подвески БГМ.

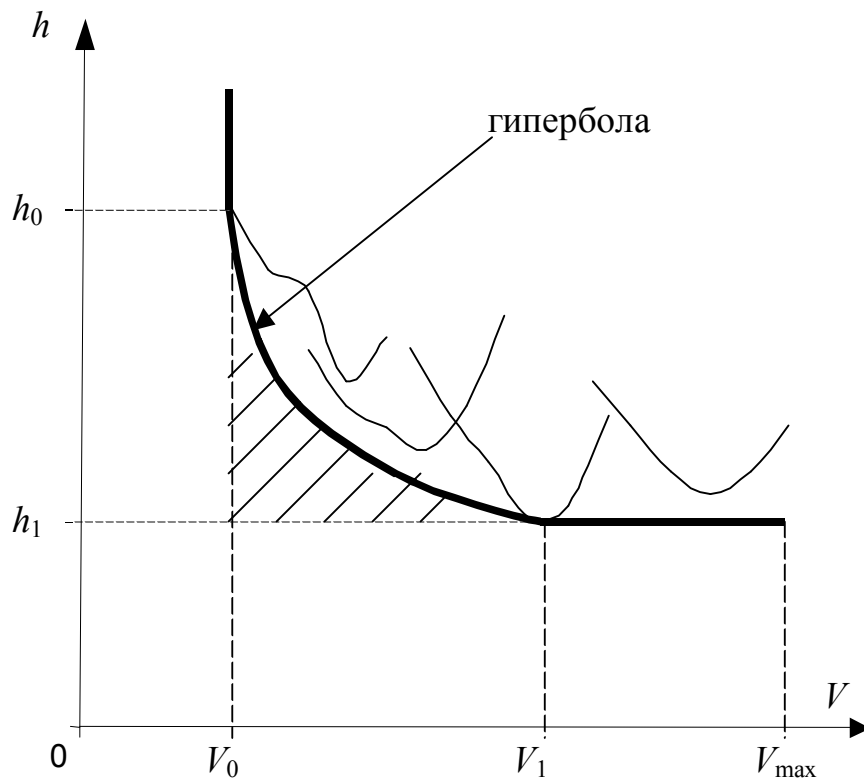


Рис. 4. Предлагаемая упрощенная скоростная характеристика

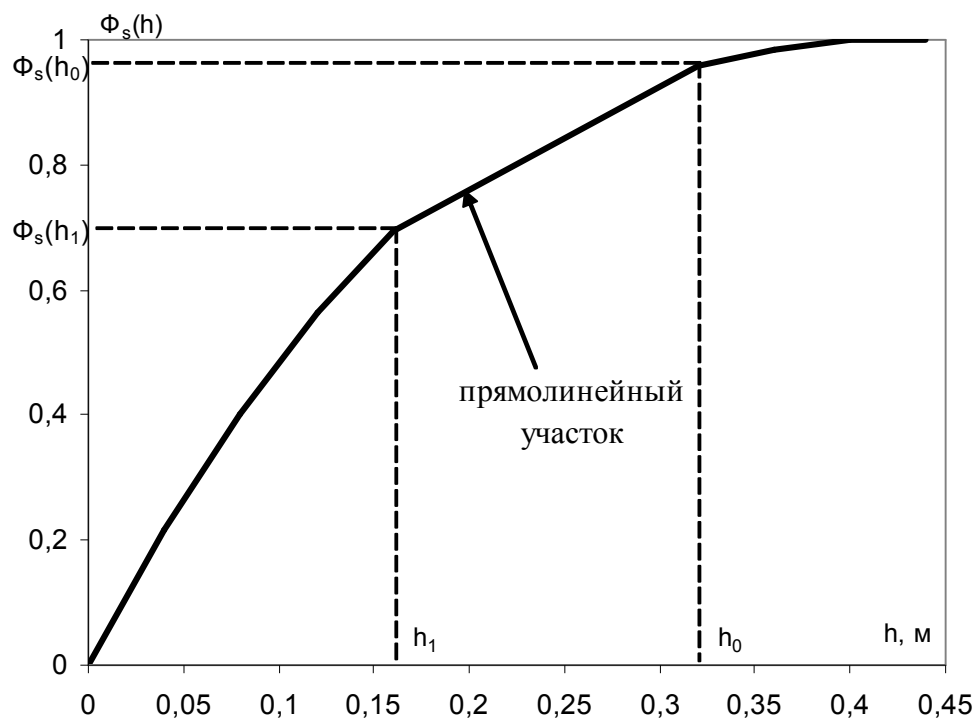


Рис. 5 Новый вид функции распределения вероятностей высоты неровностей по пути

Для дальнейшего вывода формул и получения аналитического выражения, удобного для практического использования, необходимо сделать следующее допущение. Функция распределения высот неровностей по пути, представленная на рисунке 3, на участке $h_1 \leq h \leq h_0$ заменяется прямой линией. Новый вид функции распределения высот неровностей по пути представлен на рисунке 5.

Функцию быстроходности гусеничной машины по системе подрессоривания для новой скоростной характеристики и функции распределения высот неровностей по пути, определяем по известной методике [1, 2]. В прямоугольной системе координат (рис 6), в первом квадрате строится скоростная характеристика системы подрессоривания машины $h=h(V)$, а во втором квадрате – функция распределения вероятностей высот неровностей по пути $\Phi_s(h_1)$. Тогда функция быстроходности $F_s(V)$ графически строится в четвертом квадрате выбранной системы координат. Ее

окончательный вид, показан на рис. 7. Здесь при $V \leq V_0$ и $V \geq V_1$ плотность распределения скорости по пути $\phi_{\text{сп}}(V) = |dF_s(V)/dV| = 0$.

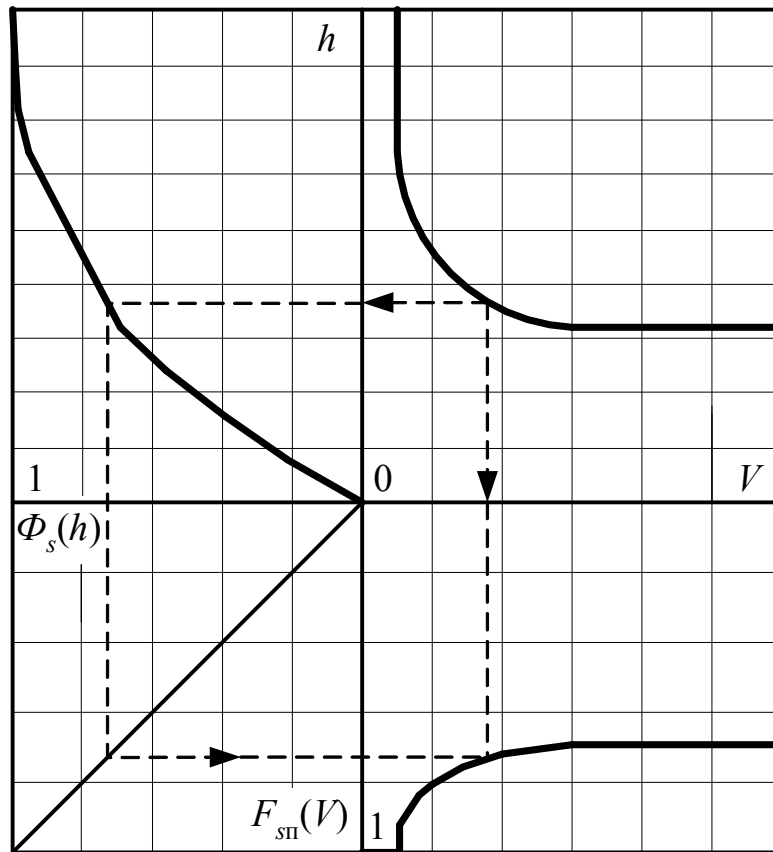


Рис. 6. Определение функция быстроходности по системе подрессоривания БГМ

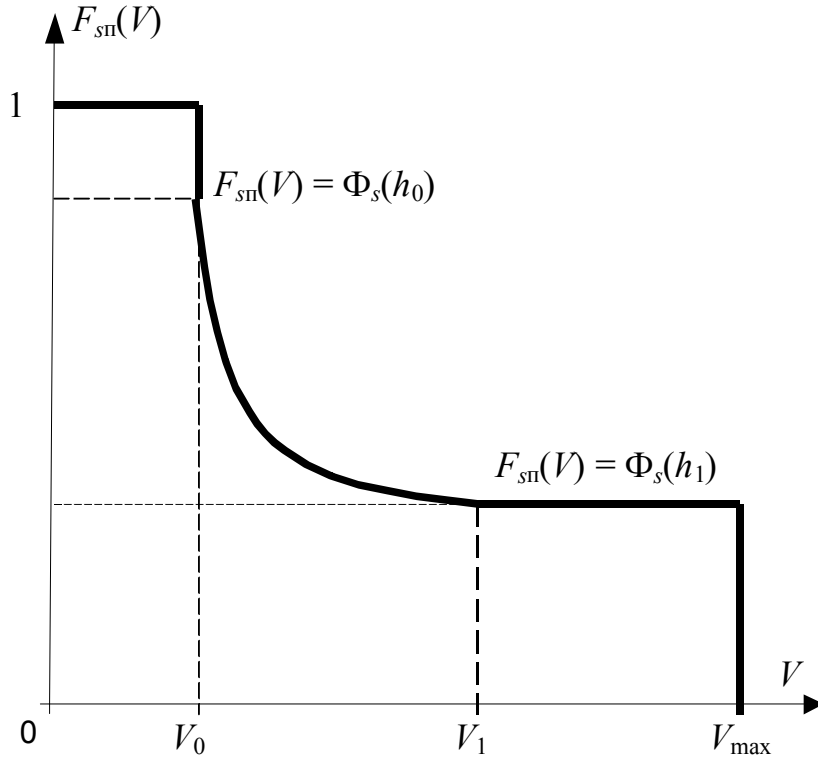


Рис. 7. Функция быстроходности по системе подрессоривания, соответствующая скоростной характеристике рис. 4 и функции распределения по пути высоты неровностей рис. 5

Интеграл из выражения (1) представим в виде суммы трех интегралов:

$$\int_0^{V_{\max}} \frac{\varphi_{\text{сп}}(V)}{V} dV = \int_0^{V_0} \frac{\varphi_{\text{сп}}(V)}{V} dV + \int_{V_0}^{V_1} \frac{\varphi_{\text{сп}}(V)}{V} dV + \int_{V_1}^{V_{\max}} \frac{\varphi_{\text{сп}}(V)}{V} dV.$$

Первый интеграл соответствует условиям движения со скоростями, не превышающими V_0 по неровностям с максимальной высотой для решения задач плавности хода однозвенных БГМ $h_0 \approx 0,4\text{м}$. Тогда вероятность того, что высота встречающиеся неровности будет больше чем h_0 , составит $1 - \Phi_s(h_0)$.

$$\int_0^{V_0} \frac{\varphi_{\text{сп}}(V)}{V} dV = [1 - \Phi_s(h_0)] \frac{1}{V_0}. \quad (4)$$

Третий интеграл соответствует условиям движения со скоростью $V_{\max}$ по неровностям высотой менее h_1 . Он примет вид:

$$\int_{V_1}^{V_{\max}} \frac{\Phi_{\text{сп}}(V)}{V} dV = \Phi_s(h_1) \frac{1}{V_{\max}}. \quad (5)$$

Получим выражение для плотности распределения скорости по пути при ограничениях по системе поддрессирования на интервале скоростей $[V_0; V_1]$.

Используя гиперболический участок скоростной характеристики (рис. 4) можно записать

$$h_i \cdot V_i = \text{const} \quad \text{или} \quad h_0 \cdot V_0 = h_1 \cdot V_1.$$

То есть, если заданы три значения, например h_1 , V_1 и h_0 , то всегда можно определить четвертое $V_0 = h_1 \cdot V_1 / h_0$.

Запишем выражение для функции быстроходности по системе поддрессирования в диапазоне скоростей $V_0 \leq V \leq V_1$, используя линейный участок функции распределения высот неровностей по пути (рис. 5).

$$F_{\text{сп}}(V) = \Phi_s(h_1) + \frac{\Phi_s(h_0) - \Phi_s(h_1)}{h_0 - h_1} (h - h_1).$$

Опуская промежуточные преобразования, получим выражение для искомого интеграла:

$$\int_{V_0}^{V_1} \frac{\Phi_{\text{сп}}(V)}{V} dV = \frac{1}{2} (\Phi_s(h_0) - \Phi_s(h_1)) \frac{V_0 + V_1}{V_1 \cdot V_0} \quad (6)$$

Используя (4), (5) и (6) запишем формулу для средней скорости по системе поддрессирования со скоростной характеристикой, представленной на рис. 4.

$$V_{\text{ср.п}} = \frac{1}{[1 - \Phi_s(h_0)] \frac{1}{V_0} + \frac{1}{2} (\Phi_s(h_0) - \Phi_s(h_1)) \frac{V_0 + V_1}{V_1 \cdot V_0} + \Phi_s(h_1) \frac{1}{V_{\text{max}}}}. \quad (7)$$

По формуле (7) получим значения средних скоростей для различных БГМ, и сравним их со скоростями, вычисленными по формулам (2) и (3) и с данными эксперимента. При этом обозначим скорости вычисленные по формулам (2), (3) и (7) $V_{\text{ср.п1}}$, $V_{\text{ср.п2}}$ и $V_{\text{ср.п3}}$ соответственно. По этим скоростям определим коэффициенты качества системы поддрессоривания, показывающие влияние системы поддрессоривания на возможную по тяговым свойствам среднюю скорость БГМ [2]:

$$K_{\text{п1}} = V_{\text{ср.п1}} / V_{\text{ср.т}}, \quad K_{\text{п2}} = V_{\text{ср.п2}} / V_{\text{ср.т}}, \quad K_{\text{п3}} = V_{\text{ср.п3}} / V_{\text{ср.т}}.$$

При расчете используем следующие исходные данные:

V_0 – скорость БГМ (около 10 км/ч) по достижению которой необходимо начинать учитывать ограничения по системе поддрессоривания. До этой скорости, скорость БГМ определяется только тягово-сцепными свойствами. V_0 рекомендуется определять по формуле $V_0 = h_1 \cdot V_1 / h_0$.

V_1 – скорость БГМ на которой скоростная характеристика подвески имеет минимум: обычно соответствует резонансу по продольно-угловым или вертикальным колебаниям корпуса БГМ.

V_{max} – максимальная скорость движения БГМ. Определяется из тактико-технических характеристик БГМ.

$V_{\text{ср.т}}$ – средняя техническая скорость по тяговым свойствам БГМ. Определяется по формуле: $V_{\text{ср.т}} = N_{\text{уг}} / f_0$ [1], где $N_{\text{уг}}$ – удельная мощность БГМ, реализуемая на грунте; $N_{\text{уг}} = (N_{\text{дв}} - \Delta N_{\text{вн}}) / G_0$; $N_{\text{дв}}$ – мощность, развиваемая двигателем; $\Delta N_{\text{вн}}$ – внутренние потери мощности в БГМ (при расчетах примем $\Delta N_{\text{вн}} = 0,1 N_{\text{дв}}$); G_0 – вес БГМ; f_0 – суммарный коэффициент сопротивления движению. Среднее значение суммарного коэффициента сопротивления движению для бездорожья составляет 0,12 [1].

h_0 – максимальная высота периодических неровностей, учитывающихся при решении задач плавности хода однозвенных БГМ ($h_0 \approx 0,4\text{м}$).

h_1 – максимальная высота периодических неровностей, которые БГМ способна преодолевать во всем скоростном диапазоне. Соответствует минимуму скоростной характеристики подвески.

$\Phi_s(h_0)$, $\Phi_s(h_1)$ – вероятности встречи неровностей, высотой менее или равной h_0 и h_1 соответственно. Определяются функцией распределения вероятностей высот неровностей по пути (рис. 3) Для $h_0 = 0,4\text{м}$ $\Phi_s(h_0) = 0,97$.

Результаты расчетов занесены в таблицу.

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что средние скорости при ограничениях режимов движения по системе поддрессоривания, рассчитанные по формулам (3) и (7):

- более согласуются с результатами экспериментальных данных (средние скорости движения БГМ 1, БГМ 2 и БГМ 3 на маршах при контрольных испытаниях в средней полосе европейской части СССР составляют 29, 33 и 36 км/ч соответственно);
- в среднем на 10% и на 23% выше, средних скоростей, вычисленных по формуле (2).

Таким образом, использование уточненных формул позволяет получить более достоверную оценку средней скорости БГМ при ограничениях режимов движения по системе поддрессоривания, что особо важно при определении нагруженности и долговечности элементов подвески БГМ. В тоже время использование формулы (2) дает гарантированный результат при оценке скорости прямолинейного движения на этапе проектирования.

Кроме того, значения коэффициентов качества системы поддрессоривания для скоростей, вычисленных по формулам (3) и (7), позволяют судить о том, дает ли

прирост средней скорости прямолинейного движения увеличение мощности двигателя. Если $K_{\text{п}} < 1$, то увеличивать мощность двигателя смысла не имеет, если $K_{\text{п}} > 1$ – увеличение мощности двигателя позволит повысить $V_{\text{ср}}$ при той же системе поддрессирования.

Таблица

Характеристики БГМ

	m, т	$N_{\text{дв}}$, кВт	V_{max} , км/ч	$N_{\text{уг}}$, кВт/т	$V_{\text{ср.т}}$, км/ч	h_1 , м	$\Phi_s(h_1)$
БГМ 1	42,4	515	60	12,15	33,4	0,15	0,65
БГМ 2	44,5	618	60	13,89	38,2	0,16	0,7
БГМ 3	46	919	70	19,98	55,0	0,17	0,75

Продолжение таблицы

V_1 , км/ч	V_0 , км/ч	$V_{\text{ср.п1}}$, км/ч	$K_{\text{п1}}$	$V_{\text{ср.п2}}$, км/ч	$K_{\text{п2}}$	$V_{\text{ср.п3}}$, км/ч	$K_{\text{п3}}$
25,9	9,72	18,0	0,54	21,3	0,63	0,75	0,64
32,4	13,0	24,1	0,63	28,7	41,2	35,0	27,4
32,4	13,8	31,4	0,57	34,6	0,75	0,92	0,82

Список литературы

1. Савочкин В.А., Дмитриев А.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин – М.: Машиностроение, 1993. – 320с.
2. Дмитриев А. А., Чобиток В. А., Тельминов А. В. Теория и расчет нелинейных систем поддрессирования гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 207 с.