

*Д.В. Донской, адъютант, НУГЗУ,  
А.Н. Ларин, д.т.н., профессор, НУГЗУ,  
А.А. Ковалёв, к.т.н., доцент, НУГЗУ*

## **ОСНОВЫ РАСЧЕТА ВНЕШНИХ СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА СПЕЦИАЛЬНУЮ МАШИНУ С ВОЗДУШНОЙ РАЗГРУЗКОЙ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ**

(представлено д.т.н. Куценком Л.Н.)

Проведен обзор ходовых систем специальных инженерных машин различных типов. Показана возможность использования в качестве ходовой системы комбинации воздушной подушки и колёсных движителей. Рассмотрены внешние силовые факторы, действующие на специальную машину с воздушной разгрузкой ходовой системы при движении в режиме частичной разгрузки.

**Ключевые слова:** инженерная машина, ходовая система, воздушная разгрузка.

**Постановка проблемы.** При реагировании на некоторые виды чрезвычайных ситуаций, таких как подтопления, снежные заносы, сели и т.д. возникает необходимость транспортировать пострадавших, оборудование и личный состав по территории чрезвычайно сложной для передвижения: бездорожье, снежная целина, водная поверхность, лёд. Применяемая на текущий момент для этих целей специальная техника не в полной мере удовлетворяет условиям оперативности, проходимости и экономичности, таким образом, возникает проблема обеспечения перемещения сил и средств, необходимых для ликвидации последствий такого вида чрезвычайных ситуаций.

**Анализ последних исследований и публикаций.** К образцам специальной техники относятся: плавающие транспортёры, инженерно-разведывательные машины (ИРМ) и машины разминирования. Примерами образцов инженерно-сапёрных машин на гусеничном ходу являются [1-2]: ИРМ «Жук» (рис. 1а.), машина разграждения Terrier (рис. 1б.). Примерами инженерных машинами прокладки маршрута и разминирования на колёсном ходу являются: машина разминирования «Искатель» (рис. 2а.) и инженерная машина Buffalo (рис. 2б.).

Примерами амфибийных машинами повышенной проходимости являются [3]: грузовая амфибия LARC-5 (рис. 3а.) и плавающий транспортёр ПТС-4 (рис. 3б.). Также в распоряжении спасательных служб находятся специализированные машины спасения на водных объектах, такие как большие и малые аппараты на воздушной подушке (АВП) (рис. 4а), аэроглиссеры (рис. 4б), спасательные катера (рис. 4в).



а) ИРМ «Жук»

б) Машина разграждения Terrier

Рис. 1. Инженерно-сапёрные машина на гусеничном ходу



а) машина разминирования  
«Искатель»

б) инженерная машина Buffalo

Рис. 2. Инженерно-сапёрные машина на колёсном ходу



а) грузовая амфибия LARC-5

б) ПТС-4

Рис. 3. Амфибийные машины повышенной проходимости



а) АВП

б) аэроглизсер

в) спасательный катер

Рис. 4. Специализированные машины спасения на водных объектах

Использование в наземных условиях современных транспортных машин на воздушной подушке весьма затруднено, так как эти машины могут эксплуатироваться только в режиме полной разгрузки с высокими энергозатратами на создание воздушной подушки, а так-же затруднено

удержание машины на курсе при боковом ветре и при движении вдоль склонов, недостаточна их маневренность [4].

Для успешного выполнения требуемых задач в любых дорожных и внедорожных условиях современные специальные машины должны иметь следующие характеристики подвижности: высокая грузоподъемность, проходимость, маневренность; минимальное давления на опорную поверхность; амфибийность.

Исходя из анализа физических принципов передвижения и существующих типов движителей, предлагается использование в качестве ходовой системы инженерной машины, комбинации воздушной подушки и колёсных движителей соединённых с корпусом машины длинноходовыми управляемыми подвесками. Используя управляемую воздушную разгрузку опорно-двигательных устройств возможны режимы движения с полной воздушной разгрузкой (над водной поверхностью, тонким льдом и т.д.), частичной воздушной разгрузкой (по бездорожью, болотам и т.д.), без воздушной разгрузки (по дорогам твёрдым покрытием).

Работы по созданию подобного типа транспортных средств с воздушной разгрузкой (ТСВР) проводятся в различных странах в рамках закрытых НИР. На рис. 4. представлена экспериментальная модель ТСВР разработанная в национальном исследовательском университете техники и технологий ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана» (РФ) [5], аналогичные модели создаются в компаниях Aerojet Rocketdyne (США), Bell Helicopter (США) и Boeing (США) [6].



Рис. 4. Экспериментальный прототип «Транспортного средства с воздушной разгрузкой»

**Постановка задачи и её решение.** Для разработки теоретических основ и математической модели движения ТСВР необходимо рассмотреть внешние силовые факторы, действующие на ТСВР при движении в режиме частичной разгрузки, и привести их аналитические выражения.

Теоретическое исследование эксплуатационных характеристик ТСВР сопряжено с построением математической модели их движения, соответствующей различным режимам и условиям эксплуатации, и последующим её доведением до практических решений.

В общей постановке задачи движение ТСВР в трехмерном пространстве, с учётом принципиальной возможности реализации всех шес-

ти степеней свободы, может быть уподоблено свободному движению твёрдого тела, как это делается в теории летательных аппаратов [7], а также в теории аппаратов на воздушной подушке (АВП) [8-9]. При движении над твёрдым экраном в режиме частичной разгрузки математическая модель движения ТСВР значительно упрощается.

Общей особенностью внешнего взаимодействия ТСВР, отличающей их от известных традиционных схем АВП, благодаря способности двигаться в режимах частичной разгрузки, является наличие дополнительных сил взаимодействия с экраном, обусловленных соприкосновением тела машины с опорной поверхностью через контактирующие элементы конструкции (колёсные движители). Поэтому в соответствии с природой внешних сил их главный вектор имеет вид

$$\bar{R}^{(e)} = \bar{Q}_{an} + \bar{R}_a^{(e)} + \bar{R}_Э^{(e)}, \quad (1)$$

где  $\bar{Q}_{an}$  – гравитационная сила (сила тяжести);  $\bar{R}_a^{(e)}$  – главный вектор аэродинамических сил;  $\bar{R}_Э^{(e)}$  – главный вектор сил взаимодействия с экраном.

Под силами взаимодействия с экраном будем понимать нормальную реакцию и силы трения. Из (1) видно, что силы, действующие со стороны экрана, занимают одно из основных мест во внешнем взаимодействии ТСВР.

При зависании над горизонтальным твёрдым экраном в режиме полной разгрузки АВП по отношению к любому возможному горизонтальному перемещению находится в состоянии безразличного равновесия, при этом усложняются вопросы обеспечения управляемости и устойчивости движения машины по заданному курсу.

При зависании ТСВР в режиме частичной разгрузки через колёсные движители осуществляется удерживающая связь, реакции которой (силы, действующие со стороны экрана) могут быть использованы для улучшения управляемости и устойчивости движения ТСВР.

Рассмотрим позиционные внешние силовые факторы, покажем их распределение по корпусу ТСВР и приведём их количественную оценку (рис. 5).

#### 1. Гравитационная сила

Сила тяжести, приложенная в точке С - точка центра масс

$$Q_{an} = mg, \quad (2)$$

где  $m$  – масса,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения тел.

Проекция на подвижные оси при горизонтальном экране:  
 $X_Q = -Q_{an} \sin \psi$

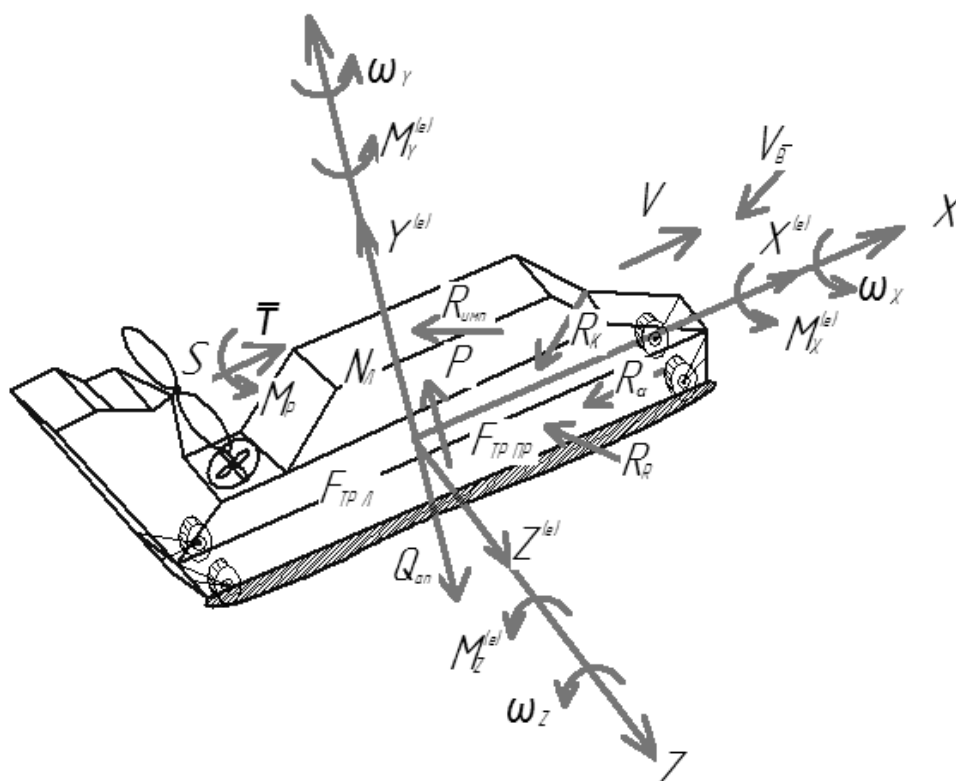


Рис. 5. Расчетная схема состояния динамического равновесия ТСВР

$$\begin{aligned} Y_Q &= -Q_{an} \cos \psi \cos \theta; \\ Z_Q &= Q_{an} \cos \psi \sin \theta, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Psi$  – угол крена ТСВР;  $\theta$  – угол дифферента ТСВР.

Моменты относительно этих осей:  $M_{XQan} = M_{YQan} + M_{ZQan} = 0$ .

## 2. Аэродинамические силы:

Активная сила тяги воздушного винта  $T$  направлена вдоль продольной оси ТСВР

$$T = T_0 \left( 1 - \frac{V_{рез}}{V_1} \right), \quad (4)$$

где  $T_0$  – статическая тяга;  $V_{рез}$  – результирующий вектор скорости набегающего потока воздуха в направлении продольного движения ТСВР

$$V_{рез} = V_X + V_{BX}, \quad (5)$$

где  $V_{BX}$  – проекция вектора скорости встречного потока воздуха на ось  $X$ ;  $V_1 = \text{const}$  – постоянная величина.

Сила  $T$  приложена в точке  $S (X_s; Y_s; 0)$ . Проекции на оси

$$\begin{aligned} X_T &= T, \quad Y_T = 0, \quad Z_T = 0T; \\ X_T &= T, \quad Y_T = 0, \quad Z_T = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

## Моменты

$$M_{X_T} = M_{Y_T} = 0, \quad M_{Z_T} = -T_{Y_S}. \quad (7)$$

Разгружающая (подъёмная) сила  $P$  воздушной подушки направлена перпендикулярно к плоскости экрана, приложена в точке  $D (X_D, Y_D, Z_D)$ .

Приняв давление по объёму подушки постоянным, можно считать

$$P = p_{вн} \cdot S_{вп}, \quad (8)$$

где  $p_{вн}$  – давление воздушной подушки;  $S_{вп}$  – площадь воздушной подушки.

При этом вектор силы  $P$  проходит через центр тяжести плоской фигуры – проекции воздушной подушки на плоскость экрана.

Проекция на оси

$$\begin{aligned} X_p &= 0; \\ Y_p &= P \cos \theta; \\ Z_p &= -P \sin \theta. \end{aligned} \quad (9)$$

## Моменты

$$\begin{aligned} M_{X_p} &= -Y_p Z_D + Z_p Y_D; \\ M_{Y_p} &= -Z_p X_D; \\ M_{Z_p} &= Y_p X_D. \end{aligned} \quad (10)$$

## 3. Силы сопротивления

Проекция вектора полного аэродинамического сопротивления на оси:

- продольная аэродинамическая сила

$$X_a = C_{X_a} \frac{1}{2} \rho v_{рез x}^2 S_{мид}; \quad (11)$$

- нормальная аэродинамическая сила

$$Y_a = C_{Y_a} \frac{1}{2} \rho v_{рез y}^2 S_{вп}; \quad (12)$$

- поперечная аэродинамическая сила

$$Z_a = C_{Z_a} \frac{1}{2} \rho v_{рез z}^2 S_{бок}, \quad (13)$$

где  $C_{X_a}, C_{Y_a}, C_{Z_a}$  – коэффициенты соответственно продольной, нормальной, поперечной аэродинамических сил сопротивления;  $\rho$  – плотность воздуха;  $v_{рез x}, v_{рез y}, v_{рез z}$  – проекции вектора скорости встречного потока воздуха на оси;  $S_{мид}$  – площадь миделева сечения;  $S_{бок}$  – площадь боковой проекции тела ТСВР на диаметральною плоскость.

Выражение  $q_j = \frac{1}{2} C_{j_a} \rho v_{резj}^2$  – определяет собой скоростной напор в направлении  $j$ -той оси.

Моменты относительно осей:

- аэродинамический момент крена

$$M_{a_x} = -Y_a Z_{Y_a} + Z_a Y_{Z_a}; \quad (14)$$

- аэродинамический момент рыскания

$$M_{a_y} = -Z_a X_{Z_a} + X_a Z_{X_a}; \quad (15)$$

- гидродинамический дифферентующий момент

$$M_{Z_{a_x}} = -X_a Y_{X_a} + Y_a X_{Y_a}, \quad (16)$$

где  $X_{Y_a}, X_{Z_a}, Y_{X_a}, Z_{X_a}, Z_{Y_a}$  – координаты точек приложения составляющих  $X_a, Y_a, Z_a$  (при равномерном распределении скоростного напора, точки приложения этих сил совпадают с центрами тяжести плоских фигур с площадями  $S_{мид}, S_{вп}, S_{бок}$ ).

Реактивный момент воздушного винта имеет величину

$$M_p = \frac{N_2}{\omega_B}, \quad (17)$$

где  $N_2$  – полезная площадь аэродинамического движителя;  $\omega$  – угловая скорость винта.

Плоскость действия  $M_p$  параллельна координатной плоскости  $YCZ$ , поэтому

$$M_{p_x} = M_p; M_{p_y} = M_{p_z} = 0. \quad (18)$$

Сила импульсного сопротивления  $R_{имп}$  приложена в области воздухоприемного отверстия, действует в плоскости, параллельной  $YCZ$ , возникает из-за реакции воздуха, втекающего в воздухозаборник вентилятора

$$\bar{R}_{имп} = \rho Q_1 \bar{V}_{рез}, \quad (19)$$

где  $Q_1$  – объемный расход воздуха, засасываемого вентилятором.

При симметричном (относительно диаметральной плоскости) расположении вентилятора

$$\begin{aligned} X_{R_{имп}} &= -\rho \cdot Q_1 \cdot v_{рез_x}; \\ Z_{R_{имп}} &= -\rho \cdot Q_1 \cdot v_{рез_z}. \end{aligned} \quad (20)$$

## Моменты

$$\begin{aligned} M_{X_{R_{\text{имп}}}} &= Z_{R_{\text{имп}}} \cdot Y_F; \\ M_{Y_{R_{\text{имп}}}} &= X_{R_{\text{имп}}} \cdot Z_F - Z_{R_{\text{имп}}} \cdot X_F; \\ M_{Z_{R_{\text{имп}}}} &= -X_{R_{\text{имп}}} \cdot Y_F, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $X_F, Y_F, Z_F$  – координаты точки F приложения силы  $\bar{R}_{\text{имп}}$

Сила реакций воздушных струй  $\bar{R}_R$  действует в плоскости экрана. Составляющие по осям будут

$$\begin{aligned} X_{R_R} &= \rho \cdot Q_{2X} \cdot v_{r_x}; \\ Z_{R_R} &= \rho \cdot Q_{2Z} \cdot v_{r_z}, \end{aligned} \quad (22)$$

где  $Q_{2j}$  – объемный расход воздуха, вытекающего в месте стыка гибкого ограждения с экраном в направлении  $j$ -той оси.

Согласно рекомендациям при висении АВП над твердым экраном можно считать

$$\begin{aligned} X_{R_R} &= -Q_{\text{ан}} \cdot \psi; \\ Z_{R_R} &= 0,54 \cdot Q_{\text{ан}} \cdot \theta, \end{aligned} \quad (23)$$

где  $X_B, Y_B, Z_B$  – координаты точки В приложения силы  $R_R$ ;  $Q_{\text{ан}}$  – инерционные силовые факторы воздуха, протекающего по трактам ТСВР.

Из этих инерционных сил выделим кориолисовы силы инерции, которые возникают при переносном вращении корпуса ТСВР и относительном поступательном движении воздуха.

Кориолисово ускорение в векторной форме

$$\bar{W}_K = 2 \cdot (\bar{\omega}_e \cdot \bar{v}_r), \quad (24)$$

где  $\bar{\omega}_e$  – вектор переносного вращения;  $\bar{v}_r$  – вектор скорости воздуха относительно тела ТСВР.

По модулю кориолисово ускорение

$$w_K = 2\omega_e v_r \sin(\bar{\omega}_e, \bar{v}_r). \quad (25)$$

Сила инерции Кориолиса  $\bar{R}_K$  (направлена противоположно вектору  $\bar{w}_K$ )

$$\bar{R}_K = -m_B \bar{w}_K, \quad (26)$$

где  $m_B$  – масса протекающего воздуха, обладающего кориолисовым ускорением. При известном направлении вектора  $\bar{R}_K$  и положении точки



приложения К ( $X_K, Y_K, Z_K$ ) проекции и моменты относительно осей определяются аналогично предыдущим векторам.

#### 4. Реактивные силы, действующие на ТСВР со стороны экрана

Нормальные реакции на опорные движители левой и правой стороны ТСВР  $N_{л}, N_{пр}$  направлены перпендикулярно к плоскости экрана.

При симметричном распределении нагрузки на все движители их реакции равны между собой ( $N_{л} = N_{пр}$ ) и эпюры контактных давлений на плоскости движителей равномерны, деформации всех пружин подвески одинаковы:  $\lambda_{ли} = \lambda_{при} = \lambda_{л} = \lambda_{пр} = \lambda$ , реакции при этом по величине равны

$$N_{л} = N_{пр} = nc\lambda, \quad (27)$$

где  $c$  – коэффициент жесткости пружин подвески при линейной упругости ( $c = \text{const}$ );  $n$  – число пружин.

В случае нелинейной упругости реакции определяются соотношением

$$N_{л_0} = N_{пр_0} = n \int_0^{\lambda} c d\lambda, \quad (28)$$

где  $c$  – коэффициент жесткости зависит от деформации пружин:  $c = c(\lambda)$ .

Углы крена  $\theta$  и дифферента  $\psi$  при симметричном распределении нагрузки считаем равными нулю ( $\theta = 0, \psi = 0$ ). Покажем, как изменяются реакции  $N_{л}$  и  $N_{пр}$  при наличии крена и дифферента.

При положительном значении угла крена ( $\theta > 0$ ) левая сторона ТСВР разгружается, правая становится более нагруженной. Величины изменения деформации пружин подвески от крена

$$\Delta\lambda_{кр} \cong \frac{B}{2} \cdot |\theta|. \quad (29)$$

Тогда реакции опорных движителей при линейной упругости пружин

$$\begin{aligned} N_{л} &\cong N_{л_0} - C \cdot \frac{B}{2} \cdot |\theta|; \\ N_{пр} &\cong N_{пр_0} + C \cdot \frac{B}{2} \cdot |\theta|. \end{aligned} \quad (30)$$

Если упругость пружин нелинейная, то

$$\begin{aligned} N_{л} &= N_{л_0} - \int_0^{\theta_1} C \frac{\beta}{2} d\theta; \\ N_{пр} &= N_{пр_0} + \int_0^{\theta_1} C \frac{\beta}{2} d\theta. \end{aligned} \quad (31)$$

При положительном угле дифферента ( $\Psi > 0$ ) передние пружины подвески разгружаются, задние становятся более нагруженными.

Изменение деформации в  $i$ -той пружине при наличии дифферента

$$\Delta \lambda_{\delta \phi_i} \cong \psi \cdot x_{\text{пр}_i}, \quad (32)$$

где  $x_{\text{пр}_i}$  – расстояние пружины до середины опорного движителя.

При линейной упругости пружины, усилие в ней составит

$$N_i = N_{0_i} - c \cdot \psi \cdot x_{\text{пр}_i}. \quad (33)$$

При этом необходимо учитывать знак  $x_{\text{пр}_i}$  (отсчёт  $x_{\text{пр}_i}$  в направлении продольной оси ТСВР).

Суммарная реакция опорного движителя при линейной упругости пружин

$$N_{\text{ОП}} = \sum_{i=1}^n N_i = N_0 - c\psi \sum_{i=1}^n x_{\text{пр}_i}. \quad (34)$$

При симметричном расположении пружин относительно оси  $Z$ ,  $\sum_{i=1}^n x_{\text{пр}_i} = 0$  и тогда

$$N_{\text{дв}} = N_0. \quad (35)$$

Считая экран плоским, контактные давления по площади поверхностей опорных движителей можно определить по формуле

$$G_{\text{КОНТ}} = \frac{P_{\text{Н0}}}{4F_{\text{ОП}}} + \frac{M_x}{J_x} + \frac{M_z}{J_z} \cdot x, \quad (36)$$

где  $P_{\text{Н0}} = 2N_0$  – нормальная сила давления ТСВР на экран при симметричном ее расположении (действует вдоль оси  $Y$ );  $M_x$ ,  $M_y$  – моменты относительно осей  $X$  и  $Y$ ;  $F_{\text{оп}} = bL$  – площадь поверхностей опорных движителей ( $L$  и  $b$  – длина и ширина);  $J_x$ ,  $J_z$  – моменты инерции площади движителей относительно осей  $X$  и  $Z$  соответственно

$$J_x = 0,5 \cdot L_{\text{дв}} \cdot b \left( \frac{b^2}{3} + B^2 \right), J_z = \frac{b \cdot L_{\text{дв}}^3}{6}, \quad (37)$$

где  $B$  – расстояние между продольными осями опорных движителей;  $X$ ,  $Y$  – координаты точки с контактным давлением  $G_{\text{конт}}$ .

Считая в любом сечении контактную нагрузку равномерно распределённой в поперечном направлении (параллельном оси  $Z$ ) и пренебрегая размером  $b$ , из (36) получим выражение ее интенсивности  $q$

$$q = \frac{N_0}{4 \cdot L_{\text{ДВ}}} + \frac{2 \cdot b_x}{L_{\text{ДВ}} \cdot b^2} \cdot Z - \frac{6 \cdot M_z}{L_{\text{ДВ}}^3} \cdot X. \quad (38)$$

### 5. Силовые факторы трения

Наличие контакта ТСВР с экраном через поверхности опорных движителей определяет дополнительное сопротивление движению в продольном направлении, а также ограничивает возможность перемещения его в поперечном направлении за счёт возникающих сил трения. Помимо этого, силы создают момент, препятствующий повороту ТСВР в плоскости экрана.

Поскольку контактные давления на левые и правые опорные движители не одинаковы, то силы трения следует рассматривать для левых и правых опорных движителей в отдельности. К тому же, конструктивные особенности опорных движителей (радиальный размер, тип протектора и т.д.), а также специфические особенности трения, вызывает необходимость учета двух различных коэффициентов трения:  $f_x$  – коэффициент продольного и  $f_z$  – коэффициент поперечного трения. Силы трения считаем подчиняющимися закону Кулона, и их величина пропорциональна нормальному давлению. Рассмотрим силовые факторы, возникающие от трения опорных движителей.

Сила продольного трения:

Для левых и правых опорных движителей

$$\begin{aligned} F_{\text{Лx}}^{\text{TP}} &= f_x \cdot N_{\text{Л}}; \\ F_{\text{ПРx}}^{\text{TP}} &= f_x \cdot N_{\text{ПР}}. \end{aligned} \quad (39)$$

Суммарная сила продольного трения

$$F_x^{\text{TP}} = f_x \cdot P_{\text{H}}, \quad (40)$$

где сила нормального давления ТСВР на экран

$$P_{\text{H}} = N_{\text{Л}} + N_{\text{ПР}}. \quad (41)$$

Аналогично силы поперечного трения

$$\begin{aligned} F_{\text{Лz}}^{\text{TP}} &= f_z \cdot N_{\text{Л}}; \\ F_{\text{ПРz}}^{\text{TP}} &= f_z \cdot N_{\text{ПР}}; \\ F_z^{\text{TP}} &= f_z \cdot N_{\text{H}}. \end{aligned} \quad (42)$$

Момент сопротивления повороту ТСВР от трения относительно произвольной точки  $M$  ( $X_M$ ;  $Z_M$ ) складывается из моментов сил продольного и поперечного трения левых и правых опорных движителей

$$M_M^{TP} = M_{L_{X_M}}^{TP} + M_{L_{Z_M}}^{TP} + M_{pp_{X_M}}^{TP} + M_{pp_{Z_M}}^{TP}. \quad (43)$$

С учётом того, что силы поперечного трения препятствуют перемещению точек левых и правых опорных движителей в плоскости экрана, то момент сопротивления  $i$ -того опорного движителя относительно произвольной точки плоскости экрана  $M$  определяется по формуле

$$M_{iZ_M}^{TP} = \frac{1}{3} f_2 q_{im} (0,25 \cdot L_{ДВ}^2 + X_M^2) + q_{in} (0,5 \cdot L_{ДВ} - X_M) + q_{i3} (0,5 \cdot L_{ДВ} + X_M)^2, \quad (44)$$

где

$$q_{in,3} = \frac{N_0}{2 \cdot L_{ДВ}} \pm \frac{M_X}{L_{ДВ}} \pm \frac{3M_Z}{L_{ДВ}^2}. \quad (45)$$

Здесь в первом случае знак «+» относится к правым опорным движителям, а «-» - к левым опорным движителям; во втором случае знак «+» относится к задним опорным движителям, а «-» - к передним опорным движителям. Соотношение (45) справедливо независимо от того, находится ли ТСВР в состоянии покоя или совершает продольное движение.

Момент сил продольного трения относительно точки  $M$

$$M_{X_M}^{TP} = F_{Л}^{TP} \left( \frac{B}{2} + X_M \right) + F_{П}^{TP} \left( \frac{B}{2} - X_M \right). \quad (46)$$

Поворот ТСВР может происходить относительно наиболее нагруженного опорного движителя. Момент сопротивления трения при этом на основании (3,47-3,49) имеет вид

$$M_K^{TP} = f_Z (0,5N_0L - M_Z) + f_X (0,5N_0B - M_X). \quad (47)$$

В заключение укажем вращательные производные внешних силовых факторов, которые следует учитывать при непоступательном движении ТСВР.

Силы и моменты аэродинамического сопротивления

$$\begin{aligned} Z_{a(\omega \neq 0)} &= \frac{dZ_a}{d\omega_y} \omega_y; \\ M_{ax(\omega \neq 0)} &= \frac{dM_{ax}}{d\omega_y} \omega_y; \\ M_{ay(\omega \neq 0)} &= \frac{dM_{ay}}{d\omega_y} \omega_y. \end{aligned} \quad (48)$$

## Силы и моменты движителя

$$\begin{aligned}
 Z_{T(\omega \neq 0)} &= \frac{dZ_T}{d\omega_y} \bar{\omega}_y; \\
 M_{Tx(\omega \neq 0)} &= \frac{dM_{Tx}}{d\omega_y} \bar{\omega}_y; \\
 M_{Ty(\omega \neq 0)} &= \frac{dM_{Ty}}{d\omega_y} \bar{\omega}_y.
 \end{aligned} \tag{49}$$

Силы и моменты от воздушной подушки определяются

$$\begin{aligned}
 Y_{P(\omega \neq 0)} &= \frac{dY_P}{d\omega_x} \bar{\omega}_x + \frac{dY_P}{d\omega_z} \bar{\omega}_z; \\
 M_{Px(\omega \neq 0)} &= \frac{dM_{Px}}{d\omega_x} \bar{\omega}_x; \\
 M_{Pz(\omega \neq 0)} &= \frac{dM_{Pz}}{d\omega_z} \bar{\omega}_z.
 \end{aligned} \tag{50}$$

Полные моменты крена и дифферента складываются из двух составляющих – восстанавливающего и демпфирующего моментов

$$\begin{aligned}
 M_{Px} &= M_{Px}(\theta) + M_{Px} \left( \dot{\theta} \right); \\
 M_{Pz} &= M_{Pz}(\psi) + M_{Pz} \left( \dot{\psi} \right).
 \end{aligned} \tag{51}$$

**Выводы.** Проведен обзор типов движителей специальных инженерных машин.

Предложено использование в качестве ходовой системы инженерной машины, комбинации воздушной подушки и колёсных движителей, соединённых с корпусом машины длинноходовыми управляемыми подвесками.

Показано что рациональным режимом эксплуатации, позволяющим наиболее полно реализовать все достоинства АВП, является движение с частичной разгрузкой опорно-двигательных устройств при помощи воздушной подушки. При этом величина разгрузки должна задаваться водителем в зависимости от дорожных условий.

Рассмотрены внешние силовые факторы, действующие на ТСВР при движении в режиме частичной разгрузки, и приведены их аналитические выражения, необходимые для разработки математической модели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование полноприводных колесных машин / [Афанасьев Б.А., Бочаров И.Ф., Жеглов Л.Ф. и др.]; под ред. Б.А. Афанасьева. –

[Том-1]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999 – 488 с.

2. Агейкин Я.С. Вездеходные колёсные и комбинированные движители / Агейкин Я.С. – М.: Машиностроение, 1972. – 183 с.

3. Движители транспортных средств высокой проходимости / [Армодеров, Бочаров И.Ф., Филюшкин А.В. и др.]; под ред. Р.Г. Армодерова. – М.: Изд-во Транспорт, 1972. – 102 с.

4. Адасинский С.А. Транспортные машины на воздушной подушке / Адасинский С.А. – М.: Наука, 1964. – 108 с.

5. Киркин С.Ф. Амфибийные транспортные машины с воздушной разгрузкой / С.Ф. Киркин // Международный ежегодник. Jane's High-Speed Marine Transportation, London. – 1997. – С. 115 – 118.

6. After Long Deployment, Leaders Praise Navy-Marine Team: (обзорная статья) [Электронный ресурс] / Cheryl Pellerin – American Forces Press Service // Top issues – Science and technology: [http // http://www.defense.gov/News/Special-Reports/0715\\_science-tech](http://www.defense.gov/News/Special-Reports/0715_science-tech).

7. Основы теории судов на воздушной подушке / [Бенуа Ю.Ю., Дьяченко В.К., Колызаев Б.А. и др.]; под ред. Ю.Ю. Бенуа. – Л.: Изд-во Судостроение, 1970 – 456 с.

8. Демешко Г. Ф. Сферы и проблемы использования современных СВП НТО им. академика А.Н. Крылова. / Демешко Г. Ф. – Л.: Наука, 1980. – 132 с.

9. Вашкевич К.П. Уравнение движения летательного аппарата на воздушной подушке / К.П. Вашкевич // Труды ЦАГИ. – 1963. – С. 137-174.

*Получено редколлегией 14.10.2016*

Д.В. Донський, О.М. Ларін, О.О. Ковальов

**Основи розрахунку зовнішніх силових факторів, що діють на спеціальну машину з повітряним розвантаження ходовий системи**

Проведено огляд ходових систем спеціальних інженерних машин різних типів. Показана можливість використання в якості ходової системи комбінації повітряної подушки і колісних рушіїв. Розглянуті зовнішні силові фактори, що діють на спеціальну машину з повітряної розвантаження ходової системи при русі в режимі часткового розвантаження.

**Ключові слова:** інженерна машина, ходова система, повітряне розвантаження.

D.V. Donskoy, A.N. Larin, A.A. Kovalev

**Fundamentals of calculation of external forces which act on the a special machine having an air unloading undercarriage**

The review of systems to ensure the movement special engineering machines of various types. The possibility of use as a ensure propulsion of system of the air cushion combination and wheel propulsion. Considered external force factors acting on a special machine with an air suspension system of trucks when driving in the partial unloading mode.

**Keywords:** engineering machine, undercarriage systems, air unloading.