

Снижение вертикальной нагрузки самолета при движении по неровным взлетно-посадочным полосам управлением характеристиками амортизированных стоек шасси

© В.А. Брусов¹, В.Н. Наумов², Д.А. Чижев²,
А.А. Долгополов¹, Ю.Ю. Мерзликин¹, А.С. Меньшиков¹

¹ФГУП «ЦАГИ», НИМК ЦАГИ, Москва, 105005, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

На основе предварительных расчетов динамической нагруженности самолета, имеющего параметры, близкие к параметрам самолета Ту-334, показано, что снижение нагруженности самолета при разбеге и пробеге по неровной взлетно-посадочной полосе (ВПП) может быть реализовано посредством управляемого изменения характеристик амортизационных стоек шасси при взлете и посадке.

При управлении колебаниями самолета путем изменения характеристик амортизационных стоек с формированием сигналов обратной связи по углу тангажа или по вертикальной перегрузке динамическая нагруженность самолета может быть уменьшена соответственно на 5 и 10...30 % в зависимости от профиля неровностей ВПП. Управление жесткостью амортизационных стоек оказывается неэффективным, что обусловлено большим запаздыванием в процессе изменения упругих характеристик стоек шасси (порядка 0,5...1 с). Эффект снижения динамической нагруженности достигается на основе управления демпфированием стоек (при реальном быстродействии изменения площади дросселирующих отверстий 0,001 с).

Ключевые слова: самолет, взлетно-посадочная полоса, амортизация, шасси, управление, взлет, посадка, безопасность, динамическая нагруженность, перегрузка.

Для обеспечения безопасной эксплуатации самолетов с колесным шасси в малоосвоенных и труднодоступных регионах необходимо существенное улучшение взлетно-посадочных характеристик самолетов. Выполнение этого условия позволит понизить требования к качеству и обслуживанию взлетно-посадочных полос (ВПП), снизить стоимость создания и содержания аэродромов, что очень важно при реализации полетов по малонагруженным линиям.

Шасси предназначены не только для ограничения перегрузки при посадочных ударах и обеспечения требуемого нормами летной годности транспортных самолетов числа взлетов и посадок (25 тыс.) [1], но и для уменьшения динамических нагрузок планера летательного аппарата (ЛА) при разбеге и пробеге по ВПП (длина дистанции для пассажирских и транспортных самолетов за срок службы составляет более 200 тыс. км). При этом даже при использовании достаточно

хорошо подготовленных ВПП появляются значительные повреждения как в шасси, так и в элементах и агрегатах планера [2, 3].

Снижение динамической нагруженности планера самолета может быть достигнуто управляемым изменением демпфирующих и амортизационных свойств стоек шасси при взлете и посадке. Изменение жесткости и демпфирования амортизационных стоек позволяет осуществлять разбег и пробег самолета по неподготовленным и слабо подготовленным ВПП без превышения допустимого уровня динамических нагрузок.

Были проведены расчетные исследования нагруженности планера самолета (рис. 1), при этом сделаны следующие допущения:

- движение самолета на полосе рассматривается в продольно-вертикальной плоскости $x_g O y_g$, разность высот неровностей ВПП в поперечной плоскости отсутствует;
- учитываются как вертикальные составляющие сил и моментов, так и силовые воздействия в продольной плоскости (полностью учитываются аэродинамика самолета и силы сопротивления при контакте пневматика колеса с поверхностью ВПП);

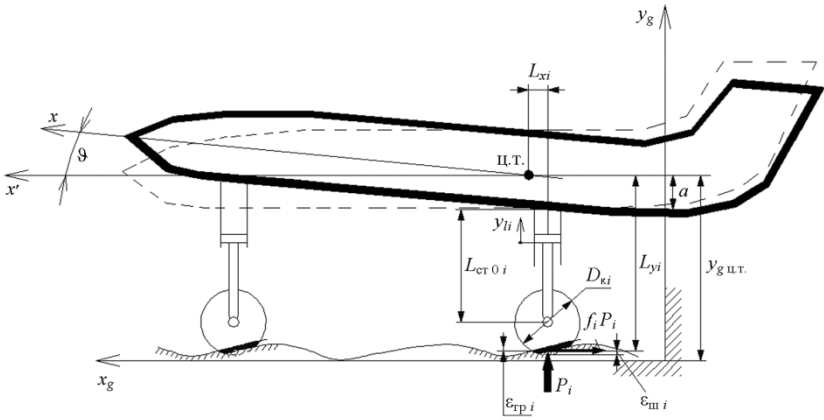


Рис. 1. Расчетная схема движения самолета по ВПП с неровностями

- планер самолета считается жестким, эффекты аэроупругости не учитываются;
- сила, действующая от j -й стойки на планер самолета, представлена соотношением $R_{ст j} = c_j y_{ст j} + k_j y_{ст j}$, где c_j — коэффициент жесткости j -й стойки; k_j — коэффициент демпфирования j -й стойки; $y_{ст j}$ — вертикальное перемещение гидроцилиндра j -й амортизационной стойки от начального положения (в матема-

тической модели выполнено ограничение хода гидроцилиндра каждой стойки самолета от 0 до $y_{стj \max}$);

- аэродинамика самолета описывается следующими силами и моментами: $X_a = c_x \frac{\rho V_x^2}{2} S$, $Y_a = c_y \frac{\rho V_x^2}{2} S$ — силы аэродинамического сопротивления по связанным осям Ox и Oy (ρ — плотность воздуха; V_x — продольная скорость; S — площадь крыла); c_x — суммарный коэффициент аэродинамического сопротивления по продольной оси; c_y — суммарный коэффициент аэродинамического сопротивления по вертикальной оси; $M_{za} = m_z \frac{\rho V_x^2}{2} S b_a$ — момент аэродинамического сопротивления (b_a — средняя аэродинамическая хорда; m_z — суммарный моментный коэффициент аэродинамического сопротивления);

- составляющие деформации пневматика колес амортизационных стоек линеаризованы: $\varepsilon_{шj} = k_{шj} R_{стj}$ — деформация шины j -й стойки;

- деформация грунта под каждым шасси определяется соотношением $\varepsilon_{грj} = \frac{R_{стj}^2 D_{кj}}{D_{кj}^2 B_{кj}^2 m \sigma^2}$, где $D_{кj}$, $B_{кj}$ — диаметр и ширина j -го колеса; m — коэффициент, учитывающий деформацию шины (зависит от σ); σ — жесткость поверхности ВПП.

Систему уравнений, которая описывает движение самолета в плоскости $x_g O y_g$, можно представить в следующем виде [4]:

$$m \ddot{y}_{г.т.} = G_y + Y_a + \sum_{j=1}^3 R_{стj};$$

$$I_z \ddot{\vartheta} = M_{za} + \sum_{j=1}^3 [R_{стj} x_{стj}] - \sum_{j=1}^3 [f_j R_{стj} L_{yj}] - Th;$$

$$m \ddot{x}_{г.т.} = T + G_x - X_a - \sum_{j=1}^3 [f_j R_{стj}].$$

(здесь и далее $y_{г.т.} \equiv y$; $\dot{y}_{г.т.} \equiv \dot{y}$; $\ddot{y}_{г.т.} \equiv \ddot{y}$; $x_{г.т.} \equiv x$; $\dot{x}_{г.т.} \equiv \dot{x}$; $\ddot{x}_{г.т.} \equiv \ddot{x}$).

В эту систему уравнений входят величины: $G_x = mg \sin \vartheta$ — сила тяжести, спроецированная на ось Ox_g ; $G_y = -mg \cos \vartheta$ — сила тяжести, спроецированная на ось Oy_g ; T — суммарная тяга маршевых двигателей ЛА; h — плечо действия силы тяги T относительно центра масс ЛА; f_j — коэффициент сопротивления j -го колеса при касании опорной поверхности; $x_{стj}$, L_{yj} — координаты колесного шасси относительно центра масс самолета в связанной системе координат (см. рис. 1); $j = 1, 2, 3$ — номера амортизационных стоек.

Перемещение штока гидроцилиндра j -й стойки $y_{стj}$ можно задать через перемещение центра масс ЛА, профиль неровности, а также обжатие грунта и пневматика колеса шасси (см. рис. 1):

$$y_{стj} = a + L_{ст0j} - y - x_{стj} \sin \vartheta + \frac{D_{кj}}{2} - \varepsilon_{грj} - \varepsilon_{шj} + y_{прj}.$$

Неровность опорной поверхности полосы ВПП задается гармонической функцией [2]:

$$y_{прj} = \frac{H_{\max}}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi v_x}{L} t + \varphi_j \right) \right],$$

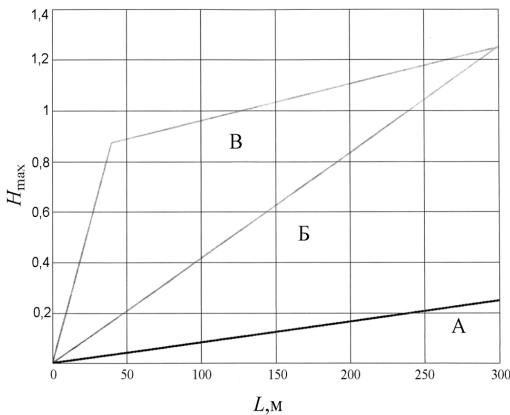


Рис. 2. Классификация ВПП по длине и ширине неровности:

А — ВПП с твердым покрытием; Б — слабо подготовленные ВПП; В — неподготовленные ВПП

где H_{\max} — максимальная высота неровности; $\varphi_j = 2\pi x_{стj} / L$ — отставание по фазе для j -й стойки относительно центра тяжести самолета. Соотношение высоты неровности H_{\max} и длины H ее профиля определяют по графику (рис. 2). При этом выделяют три типа ВПП: зона А — хорошо подготовленные полосы (бетонные), зона Б — слабо подготовленные полосы, зона В — неподготовленные полосы.

Исследования по разработке методики и алгоритмов управления характеристиками амортизационных стоек шасси при разбеге и пробеге по неровной ВПП

выполняли на примере самолета, имеющего характеристики, близкие к характеристикам самолета Ту-334 [5]. Самолет имеет трехпорную систему шасси. В качестве параметров шасси, которые можно изменять во время посадки или взлета самолета, рассматривали жесткость и демпфирование стоек.

При решении задачи нахождения оптимального управления характеристиками амортизационных стоек самолета рассматривали четыре возможных варианта параметров шасси самолета (см. таблицу). Основным критерием качества управления была выбрана вертикальная перегрузка в центре тяжести планера самолета.

Варианты параметров шасси самолета

Номер варианта шасси	Параметры шасси	
	Коэффициент жесткости \tilde{n}_j	Коэффициент демпфирования k_j
1	$c_j = \text{const}$	$k_j = \text{const}$
2	$c_j = c_{0j} + k_{c_j} \ddot{y}th[t/t_{\max 1}]$	$k_j = \text{const}$
3	$c_j = \text{const}$	$k_j = k_{0j} + k_{k_j} \dot{y}th[t/t_{\max 2}]$
4	$c_j = c_{0j} + k_{c_j} \ddot{y}th[t/t_{\max 1}]$	$k_j = k_{0j} + k_{k_j} \dot{y}th[t/t_{\max 2}]$

Примечание. k_{c_j} , k_{k_j} — коэффициенты обратной связи; $t_{\max 1} = 1...5$ с — время изменения характеристик жесткости шасси (изменение объема гидропневмоаккумулятора и давления его запитки); $t_{\max 2} = 5 \cdot 10^{-3}$ с — время изменения характеристик демпфирования шасси (изменение диаметра дросселирующего отверстия).

Выполнены расчеты движения самолета с постоянной скоростью на полосах с неровностями, характерными для трех типов ВПП: подготовленных бетонных, слабо подготовленных грунтовых и неподготовленных грунтовых. Высота неровности зависела от длины L ее профиля, которую принимали равной 50, 100, 150, 200 м.

По результатам расчетных исследований можно сделать следующие выводы.

1. С помощью описанной математической модели идентифицировано влияние основных параметров амортизационных стоек на нагруженность планера самолета при разбеге и пробеге по ВПП с различными неровностями.

2. Показано, что параметры стоек шасси, которые, как правило, выбирают, исходя из условия поглощения энергии посадочного удара, не всегда обеспечивают приемлемое снижение стойками нагрузок от возмущающего воздействия неровностей полосы ВПП (для грузо-

вых и пассажирских самолетов, эксплуатируемых только на бетонных полосах класса А). Например, при движении по ВПП сила гидравлического сопротивления демфера стойки шасси должна быть больше, чем в момент посадки ЛА.

3. Определены максимальные значения перегрузок в зависимости от скорости движения самолета по ВПП различного класса: для класса А — $n_{y\max} = 0,42$; для класса Б — $n_{y\max} = 2,2$; для класса В — $n_{y\max} = 4,3$ (рис. 3).

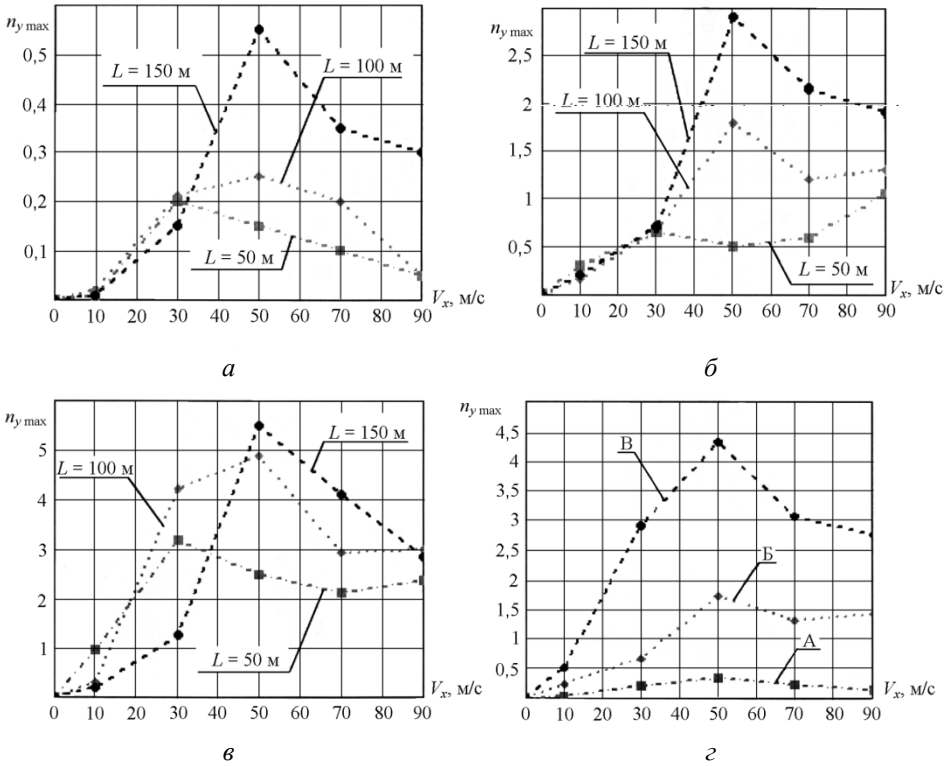


Рис. 3. Максимальные значения амплитуды вертикальной перегрузки в центре тяжести самолета в зависимости от продольной скорости и длины волны:

а — для подготовленных бетонных ВПП (класс А); *б* — для слабо подготовленных грунтовых ВПП (класс Б); *в* — для неподготовленных грунтовых ВПП (класс В); *г* — средние значения амплитуды вертикальной перегрузки в центре тяжести самолета в зависимости от продольной скорости и длины волны для различных ВПП

4. Расчетные исследования показали, что нагруженность самолета при разбеге и пробеге можно снизить, управляя характеристиками амортизационных стоек шасси, в частности, при изменении коэффици-

ента демпфирования вертикальные перегрузки уменьшаются на 10 ... 25 % (в зависимости от класса ВПП и скорости движения самолета). В случае движения самолета по ВПП с неровностями гармонического профиля управление на основе изменения коэффициентов жесткости стоек шасси рассмотренной конструкции нецелесообразно вследствие большого значения постоянной времени изменения жесткости шасси (этот процесс связан с изменением объема пневмоаккумулятора и давления его запитки). Управление таким способом может быть эффективным при единичных неровностях на полосе, представляющих опасность для самолета. В этом случае, используя визуальные приборы (в том числе предварительного сканирования полосы ВПП), летчик может заранее (за 5...10 с) подготовить шасси к приближающейся неровности.

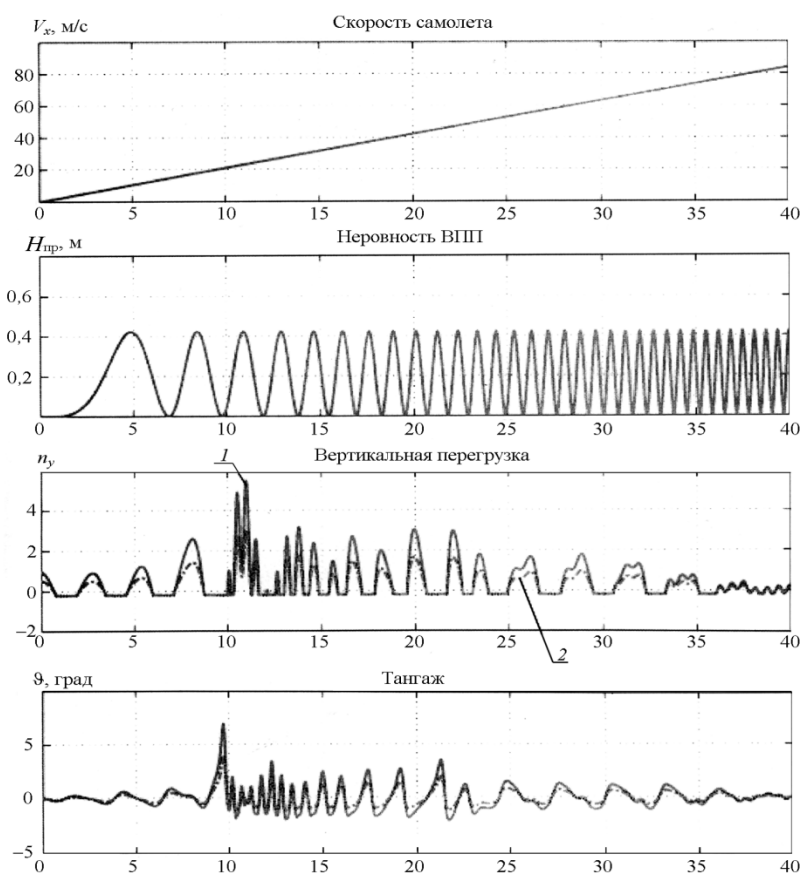


Рис. 4. Динамика самолета при разбеге (неровность: $L=100$ м, $H_{\max} = 0,42$ м; управление осуществляется на основе изменения коэффициентов демпфирования стоек ЛА ($k_j = \text{var}$); сигнал обратной связи формируется по углу тангажа):
 1 — ЛА с нерегулируемыми параметрами стоек; 2 — ЛА с регулируемыми параметрами стоек

5. Установлено, что разбег самолета с нерегулируемыми характеристиками амортизационных стоек по ВПП с неровностями, характерными для элементарно подготовленных и неподготовленных полос, можно разбить по критерию динамической нагруженности на три этапа (см. рис. 3):

а) скорость ЛА в диапазоне 10...25 м/с — вертикальные перегрузки не превосходят допустимые; частота колебаний объекта совпадает с частотой встречи с неровностями полосы ВПП;

б) скорость ЛА в диапазоне 25...60 м/с — вертикальные перегрузки превышают допустимые величины по нормам АП-25 [1]; частота колебаний не во всех случаях совпадает с частотой встречи с неровностями полосы ВПП; необходимо изменять параметры жесткости и демпфирования амортизационных стоек в режиме реального времени разбега или пробега (пример управления характеристиками амортизационных стоек самолета за счет изменения свойств демпфирования представлен на рис. 4);

в) скорость ЛА в диапазоне от 60 м/с до $v_{взл}$ — вес самолета «разгружен» подъемной силой; вертикальные перегрузки не превосходят допустимые, частота колебаний объекта изменяется; при приближении к взлетной скорости частота колебаний начинает совпадать с частотой встречи с неровностями полосы ВПП; при необходимости возможно эффективное управление органами горизонтального и вертикального оперения.

Проведенные теоретические исследования могут быть полезны на этапе проектирования шасси самолета, а также при выборе его схемы и параметров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Авиационные правила. Ч. 25: Нормы летной годности самолетов транспортной категории*. Москва, Изд-во МАК, 1994.
- [2] Влияние эксплуатации самолета с неровных аэродромов на конструкцию шасси. *Новости зарубежной науки и техники. Сер. Авиационная и ракетная техника*. Москва, Изд-во ЦАГИ, 1987, № 15.
- [3] Кутелев М.М. Математическая модель системы «самолет — шасси — взлетно-посадочная полоса». *Методы исследования при создании современных самолетов*, 1986, № 2.
- [4] Белоус А.А. Амортизация шасси с рычажной подвеской колеса. *Труды ЦАГИ*, № 678. 1949
- [5] Пятин А.И. Динамика полета и пилотирование самолета Ту-154. *Воздушный транспорт*, 1994, № 4.

Статья поступила в редакцию 03.10.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Брусов В.А., Наумов В.Н., Чижев Д.А., Долгополов А.А., Мерзликін Ю.Ю., Меньшиков А.С. Снижение вертикальной нагрузки самолета

при движении по неровным взлетно-посадочным полосам управлением характеристиками амортизационных стоек шасси. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1304.html>

Брусов Василий Андреевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГУП «ЦАГИ». Специалист в области динамики летательных аппаратов и транспортных средств на воздушной подушке, гидравлики и гидропневмоавтоматики. e-mail: Vasyab2@rambler.ru



Наумов Валерий Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Президента РФ, специалист в области проектирования и расчета транспортных систем. e-mail: naumovvn@yandex.ru



Чижов Дмитрий Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области динамики мобильных роботов. e-mail: tankist_83@mail.ru

Долгополов Александр Андреевич — старший научный сотрудник ФГУП «ЦАГИ». Специалист в области динамики летательных аппаратов и транспортных средств на воздушной подушке, стационарной и нестационарной аэродинамики летательных аппаратов. e-mail: dolgoplov.aviafgup@gmail.com



Мерзликін Юрий Юрьевич — главный инженер НИО-12 ФГУП «ЦАГИ». Специалист в области стационарной и нестационарной аэродинамики летательных аппаратов. e-mail: ymerzlikin@gmail.com



Меньшиков Алексей Сергеевич — инженер отдела № 2 НИО-12 ФГУП «ЦАГИ». Специалист в области аэродинамики летательных аппаратов. e-mail: lyoshamenshikov@yandex.ru



Reducing the vertical load of the aircraft when traveling over rough runways by running characteristics of depreciation landing gear

© V.A. Brusov¹, V.N. Naumov², D.A. Chizhov², A.A. Dolgopolo¹,
Yu. Yu. Merzlikin¹, A.S. Menshikov¹

¹Central Aerohydrodynamic Institute, NIMK TsAGI, Moscow, 105005, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

In the article we show that to provide safe operation of aircrafts with wheeled undercarriage in the areas with poorly developed infrastructure in difficult-to-access regions, which have no prepared runways, it is necessary to decrease essentially the level of dynamic load of the airplane during take-off and landing. Preliminary calculations indicate, that the load of the plane during takes-off and landing could be essentially decreased by means of control changing of undercarriage characteristics. When these characteristics control oscillation of the airplane with back feed by trim angle or by vertical acceleration, then dynamic load could be 5 or 10...30 percent, respectively, down depending on runway roughness profile. This effect could be achieved by undercarriage damping characteristics control. Control of elasticity is inefficient because of control means delay.

Keywords: aircraft, runway, shock absorption, undercarriage, control, take-off, landing, safety, dynamic load, acceleration.

REFERENCES

- [1] *Aviatsionnye pravila. Chast 25. Normy letnoy godnosti samoletov transportnoy kategorii* [Flying regulations. Part 25. Standards of transport aircrafts flying suitability]. Moscow, MAC Publ., 1994.
- [2] *Vliyanie ekspluatatsii samoleta s nerovnykh aerodromov na konstruktsiyu shassi* [Influence of aircrafts operation from rough airfields on undercarriage]. *Novosti zarubezhnoy nauki I tekhniki. Seriya Aviatsiya i raketnaya tekhnika — News of Foreign Science and Technics. Series Aviation and Rocketry*. Moscow, TsAGI Publ., 1987, no. 15.
- [3] Kutelev M.M. *Matematicheskaya model sistemy samolet – shassi – vzletno-posadochnaya polosa* [Mathematical model of the aircraft – undercarriage – runway system]. *Metody issledovaniya pri sozdanii sovremennykh samoletov — Research Methods of Modern Aircrafts Creation*, 1986, no. 2.
- [4] Belous A.A. *Amortizatsiya shassi s rychazhnoy podveskoy koleasa* [Shock absorption of undercarriage with lever wheels suspension]. *Trudy TsAGI — TSAGI Works*, 1949, no. 678.
- [5] Pyatin A.I. *Dinamica poleta I pilotirovanie samoleta Tu-154* [Dynamic of flight and piloting of Tu-154 aircraft]. *Vozdushnyi transport — Air Transport*. 1994, no. 4.

Brusov V.A., Ph.D., senior researcher in Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). Specialist in the field of dynamics of air-cushion aircraft and vehicles, hydraulics, hydraulic pneumoautomatics. e-mail: Vasyab2@rambler.ru

Naumov V.N. (b. 1941) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1965. Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation. Head of the Tracked Vehicle and Mobile Robots De-partment at Bauman Moscow State Tech-

nical University. Author of 300 publications in the field of transport machinery. e-mail: naumovvn@yandex.ru

Chizhov D.A., Ph.D., assoc. professor of the Tracked Vehicle and Mobile Robots Department at Bauman Moscow State Technical University. Specialist in the dynamics of mobile robots. e-mail: tankist_83@mail.ru

Dolgopolov A.A., a senior researcher in the Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). Specialist in the field of dynamics of aircraft and, air-cushion vehicles, steady and unsteady aerodynamics of aircraft. e-mail: dolgopolov.aviafgup@gmail.com

Merzlikin Yu.Yu., chief engineer in the Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). Specialist in the field of stationary and nonstationary aerodynamics of aircraft. e-mail: ymerzlikin@gmail.com

Menshikov A.S., an engineer of the Department no. 2 at the Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). Specialist in aircraft aerodynamics. e-mail: lyoshamenshikov@yandex.ru