

Улучшение проходимости, плавности хода и управляемости летательных аппаратов и транспортных средств с регулируемым комбинированным шасси на воздушной подушке

© В.Н. Наумов², В.А. Брусов¹, А.А. Долгополов¹, Д.А. Чижов²,
Ю.Ю. Мерзликин¹, А.С. Меньшиков¹

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

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

Разработана методика выбора и оптимизации параметров комплексных алгоритмов управления системами комбинированного шасси и аэродинамическими элементами планера летательного аппарата (ЛА) для снижения динамических нагрузок ЛА при движении по неровной взлетно-посадочной полосе (ВПП) и обеспечения курсовой устойчивости и управляемости ЛА в условиях разбега и пробега при боковом ветре и уклоне ВПП. В результате расчетно-экспериментальных исследований шасси с регулируемым давлением в секциях воздушной подушки (ВП) установлена возможность использования для взлета и посадки ЛА слабо подготовленных и неподготовленных грунтовых ВПП, площадок равнинной местности с низкой несущей способностью, водных поверхностей. Показано, что в условиях бокового ветра и при уклоне ВПП выдерживание выбранных направлений разбега и пробега должно осуществляться поворотом ЛА на соответствующие балансирующие углы скольжения. Автоматизация управления ЛА с шасси на воздушной подушке (ШВП) при разработанных алгоритмах позволяет уменьшить в этих условиях боковое отклонение ЛА от оси ВПП до 2,5 м. Для прогнозирования энерговооруженности и энергоэффективности ЛА и транспортных средств с ШВП высокой проходимости при широком спектре изменяющихся конструктивных и эксплуатационных параметров объектов разработана и верифицирована математическая модель их движения по деформируемому опорному основанию. Модель позволяет обрабатывать существующие и создавать новые алгоритмы и методы управления раздачей мощности между ведущими колесами и ВП комбинированного шасси и дает возможность реализовать наиболее экономичные режимы движения объектов.

Ключевые слова: динамика движения, система дифференциальных уравнений, математическая модель, возмущающее воздействие неровности, управление, амортизационная стойка.

Применение на летательных аппаратах (ЛА) шасси на воздушной подушке (ШВП) качественно расширяет их эксплуатационные возможности, обеспечивая базирование (при выполнении условий амфибийности и проходимости) на водных и слабо подготовленных площадках с низкой несущей способностью. Разбег и пробег ЛА на таких

поверхностях, отличающихся в несколько раз большими по высоте периодически чередующимися неровностями, чем на обычных аэродромах, связаны с ростом возмущений от поверхности передвижения и превышением уровня допустимой динамической нагруженности ЛА.

Понизить динамическую нагруженность ЛА с ШВП при движении по таким поверхностям до приемлемого уровня можно путем управляемого изменения сил и моментов ШВП. Об этом свидетельствует, в частности, опыт управления колебаниями автомобилей и гусеничных машин [1, 2].

Добиться продольного и поперечного моментов от воздействия ШВП на ЛА для обеспечения управления его продольными и поперечными колебаниями возможно, например, благодаря задаваемому с помощью поворотных заслонок, расположенных за нагнетателями, перераспределению потоков воздуха между носовыми и кормовыми частями бортовых полостей баллонов и соответствующему изменению избыточных давлений в навесных элементах и секциях воздушной подушки (ВП) под элементами [3, 4].

Для решения указанной проблемы необходимо определить рациональные способы управления объектом, выбрать оптимальные по нескольким критериям исполнительные устройства (приводы) для систем управления. Наиболее подходящим вариантом привода является автономный электрогидравлический привод дроссельного регулирования или электропневматический привод с однокаскадным управлением типа сопло — заслонка [5].

Для описания динамики движения ЛА с ШВП при разбеге и пробеге использована система дифференциальных уравнений пространственного движения ЛА, дополненная дифференциальными уравнениями движения массовых расходов воздуха через полости ШВП. Аэродинамические силы и моменты при движении ЛА представлены в принятой форме. Силы и моменты от ШВП выражены через произведения избыточных давлений в секциях ВП и их площадей, контактного сопротивления элементов ограждения с поверхностью и импульсного сопротивления воздуха на входе в нагнетатели.

Математическая модель сформирована по блочному принципу, который делает ее универсальной, позволяя изменять форму представления блоков в соответствии с конкретными задачами или накоплением экспериментальных данных. Обобщенная математическая модель ЛА с ШВП на этапах разбега и пробега (рис. 1) представляет собой:

- уравнения пространственного движения ЛА, в которых учтены силы и моменты от ВП, силы и моменты от входного импульса в нагнетатели ВП и аэродинамические движители, силы и моменты при контакте гибкого ограждения с опорной поверхностью, аэроди-

наимические силы и моменты, модель маршевой силовой установки, модель нагнетательных установок ВП, модель аэродинамических движателей;

- систему управления, включающую массив управляющих сигналов для привода исполнительных элементов (у модели ШВП [4] — дроссельных заслонок) при различных параметрах движения ЛА;
- модель ВП, включающую уравнения массовых расходов течения сжатого воздуха в ее секциях;
- модели неровностей опорной поверхности, по которой движется ЛА;
- модель ветровых возмущений;
- управляющие воздействия оператора.

При математическом моделировании были приняты следующие допущения. Давление и плотность воздуха по объему каждой полости ВП распределяются равномерно, а процессы сжатия воздуха политропные. Такое допущение исключает необходимость дополнительного использования уравнений энергии для полостей ВП. При быстром изменении давления в полостях ВП, характерном для автоколебательных процессов при движении ЛА с ШВП с большой скоростью по неровной взлетно-посадочной полосе (ВПП), значение показателя политропы близко к значению показателя адиабаты. Перетекание воздуха между полостями ВП и из ВП в атмосферу рассматривается в рамках теории стационарно-

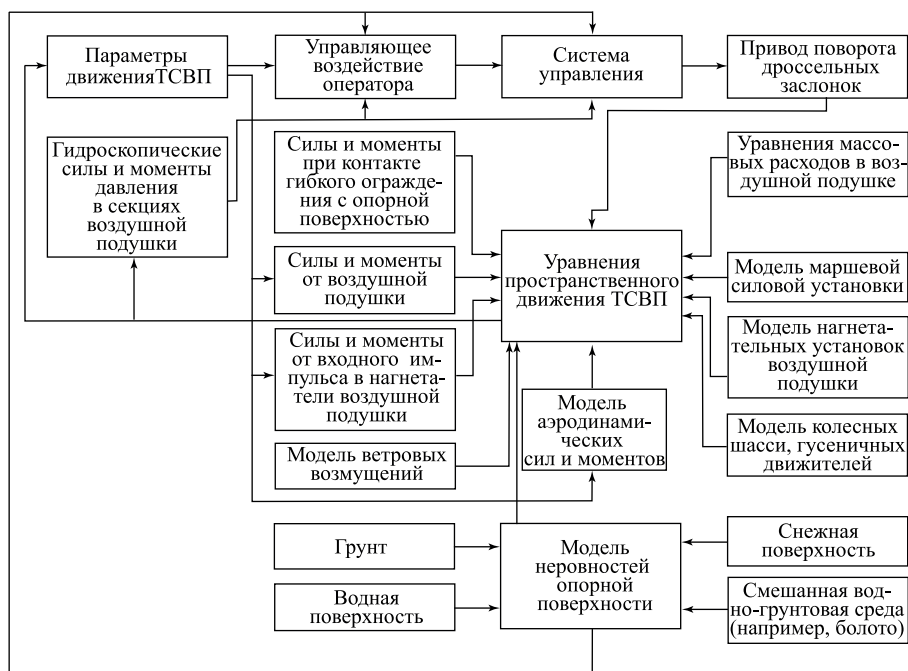


Рис. 1. Обобщенная структурная схема математической модели ЛА с ШВП или транспортного средства с ВП (ТСВП) на этапах разбега-пробега

го течения несжимаемого газа. Правомерность таких допущений подтверждена экспериментальными, а также расчетными исследованиями схематизированных моделей ВП.

Возмущающее воздействие неровности на ЛА с ШВП в процессе его движения по ВПП в уравнениях задается через текущие значения зазоров истечения воздуха из секций ВП под элементами гибкого ограждения и скоростей изменения контрольных объемов полостей (секций) ВП. Эти значения обусловлены:

- вертикальными и угловыми перемещениями ЛА относительно опорной поверхности;
- изменением формы ограждения в результате изменения текущих значений перепадов давления в полостях ограждения ВП и его обжатия опорной поверхностью;
- изменением высот неровностей опорной поверхности под элементами ВП;
- изменением составляющих объемов полостей (секций) ВП в зависимости от профиля пути при поступательном движении ЛА.

В целом по результатам расчетных и экспериментальных исследований модели ШВП с многосекционной ВП и управляемым распределением потоков воздуха в секциях ВП при статических и буксировочных испытаниях на взволнованной водной поверхности в гидроканале ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная в ходе исследований математическая модель ШВП верифицирована экспериментальными исследованиями. Об этом свидетельствует сравнение параметров движения буксируемой модели ШВП (перегрузка, вертикальное перемещение, угол тангажа, обжатия элементов ограждения, давление в секциях системы формирования ВП и др.) и результатов их расчетов. Пример такого сравнения по вертикальной перегрузке n_n в носовой части ШВП в процессе движения модели со скоростью $V = 7$ м/с по взволнованной водной поверхности при длине волны $L = 5,0$ м и ее высоте $h = 55$ мм приведен на рис. 2.

2. Математическая модель может быть использована для расчета параметров движения ЛА с ШВП при его разбеге и пробеге по неподготовленной и слабо подготовленной ВПП, характеризующейся значительными по высоте неровностями.

3. Исследования выбора алгоритма управления характеристиками ШВП с помощью поворотных дроссельных заслонок, распределяющих массовые расходы воздуха в носовые и кормовые секции ВП, свидетельствуют о том, что перегрузки при разбеге и пробеге самолета с регулируемым ШВП могут быть уменьшены в 1,5–2 раза по сравнению с перегрузками при движении самолета с нерегулируемым ШВП (рис. 3). Наибольший эффект снижения перегрузок достигается при использовании регулируемого шасси с адаптивным контуром, включающим эталонную модель с изменяющимися коэффициентами.

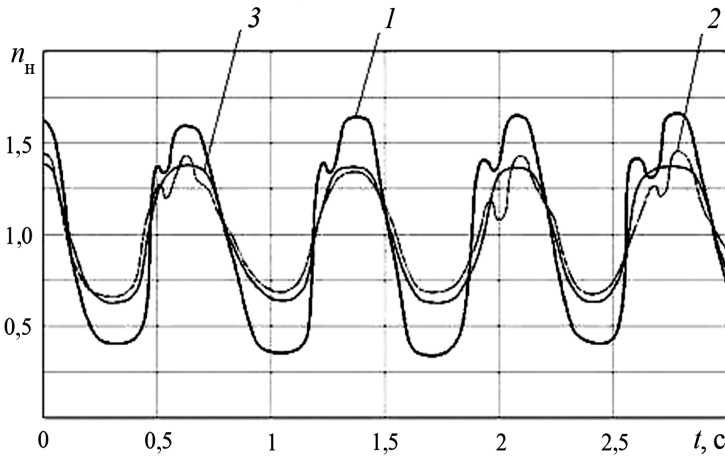


Рис. 2. Перегрузки в носовой части ШВП:

1 — нерегулируемое движение (эксперимент); 2 — регулируемое движение ШВП (эксперимент); 3 — регулируемое движение ШВП (расчет)

Отметим, что применение в конструкции самолета ШВП обуславливает принципиальные особенности его пилотирования при движении по ВПП. Это объясняется тем, что ШВП, в отличие от колесного шасси, не может компенсировать боковые силы при разбеге, пробеге и маневрировании самолета (при боковом ветре, поперечном наклоне ВПП), так как реакция взаимодействия ШВП при контакте с ВПП, представляющая собой сопротивление движению самолета, направлена по вектору путевой скорости.

На некоторых экспериментальных самолетах с ШВП, а также в проектах относительно тяжелых ЛА (взлетная масса более 20 т) было предусмотрено использование комбинированного шасси, состоящего из ШВП, воспринимающего большую часть веса самолета, и дополнительного малонагруженного колесного шасси для удержания заданного направления движения по грунтовым ВПП. Однако, как показали испытания экспериментальных ЛА с ШВП и расчетные оценки параметров их движения по ВПП [5], разбег, пробег и маневрирование в условиях боко-

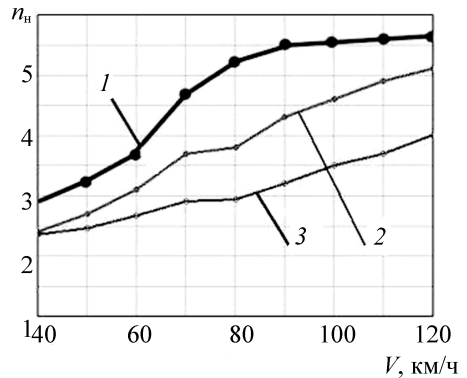


Рис. 3. Зависимость вертикальной перегрузки от скорости движения ЛА с ШВП:

1 — перегрузка ЛА с ШВП без системы управления; 2 — перегрузка ЛА с ШВП с обычной системой управления; 3 — перегрузка ЛА с ШВП с адаптивной системой управления

вого ветра могут выполняться и без применения колесных опор. В этом случае для парирования боковой силы при взлете и посадке ЛА принимают во внимание проекцию вектора тяги его маршевых двигателей при управляемом повороте самолета «на ветер» на некоторый угол рыскания соответствующим разворачивающим моментом.

Разворачивающий момент может быть создан регулируемыми соплами, через которые выдувается сжатый воздух от нагнетателя ШВП, рулями направления, несимметричным торможением бортовыми протекторами ШВП (ЛА-4, ХС-8А «Bufallo» с ШВП) или бортовыми тормозными элементами («лыжами»), а также несимметричной тягой двигателей (Ан-14ш, ХС-8А «Bufallo» с ШВП, Ан-72ш, Боинг 737-100 и др.).

Несимметричное торможение бортовыми протекторами ШВП можно реализовать также при управляемом наклоне на соответствующий борт: либо созданием момента крена при несимметричном отклонении аэродинамических поверхностей в потоке за маршевыми двигателями, либо несимметричным отклонением элеронов и элевонов. Эффективность и целесообразность применения указанных органов управления зависит от компоновочных особенностей ЛА. Дополнительные колесные опоры следует использовать только при рулежке и на невысоких скоростях.

При посадке самолета с углом рыскания боковой удар от ШВП, в отличие от применения колесного шасси, практически отсутствует, посадка и взлет самолета с ШВП отличаются более высоким уровнем безопасности. Об этом, в частности, свидетельствуют заключения летчиков-испытателей самолетов с ШВП (В.Г. Лысенко, А.Ф. Земляной). Однако, несмотря на положительные в целом результаты испытаний экспериментальных самолетов с ШВП, а также расчетные оценки их движения по ВПП, для каждого проектируемого самолета с ШВП необходимо проведение детальных исследований для изучения его динамики на этапах взлета и посадки, являющихся наиболее сложными и ответственными в полете.

Разработана математическая модель и выполнены расчеты динамики разбега и пробега самолетов с ШВП различной тяговооруженности. Предложены законы ручного и автоматизированного управления самолетами при разбеге и пробеге в условиях бокового ветра и при уклоне ВПП.

Показано, например, что для самолета МиГ-ТА4 необходимый уровень эффективности руля направления по развороту самолета «на ветер» и уменьшения возмущающей силы, вызванной скольжением, достигается обдувом вертикального оперения струями от работающих двигателей [6]. При посадке эффективность рулей

направления может быть недостаточной, особенно при реверсе тяги. Для создания угла крена, препятствующего развитию бокового отклонения самолета от оси ВПП, целесообразно использовать управление элеронами. Установлена возможность выполнения взлета и посадки самолета при боковом ветре 15 м/с и боковых отклонениях от оси ВПП в процессе разбега и пробега, не превышающих 10 м.

Показано, что при автоматизированном управлении самолетом (если реализованы рассмотренные в расчетных исследованиях законы управления) отклонение от оси ВПП может быть уменьшено по сравнению с отклонениями при ручном управлении в несколько раз. Расчетными исследованиями управления самолетом типа Ан-28 с ШВП доказано, что лучшим вариантом управления по отклонению от оси ВПП при разбеге является управление несимметричным изменением тяги маршевых двигателей. Однако при этом способе заметно увеличивается длина разбега самолета. Минимальная длина разбега и приемлемое отклонение от оси ВПП достигаются при управлении рулем направления, эффективность которого достаточна при высоких скоростях движения ЛА. При пробеге целесообразно управлять несимметричным подтормаживанием контактными опорами шасси, а при малых скоростях дополнительно включать в управление управляющие органы ВП.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фурунжиев Р.Ф., Останин А.Н. *Управление колебаниями многоопорных машин*. Москва, Машиностроение, 1984.
- [2] Котиев Г.О., Сарач Е.Б. *Комплексное поддрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
- [3] Долгополов А.А., Вишневский Г.А., Волостных В.Н., Мерзликин Ю.Ю., Митрофович В.В., Маслов Л.А., Журавлев Ю.Ф., Банников Ю.М., Гуськов В.Н., Ташкаев В.И., Близнюк А.М., Гуськов А. В. Амфибийные аппараты ЗАО «Комвен» с многосекционным ограждением шасси на воздушной подушке. *Сб. докл. VI науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2006»*. Москва, Изд-во ЦАГИ, 2006.
- [4] Долгополов А.А., Захарченко Ю.А., Брусов В.А., Гуськов В.Н., Лисин Н.А., Мерзликин Ю.Ю., Морозов В.П., Наумов В.Н., Ташкаев В.И. Снижение динамической нагруженности ЛА с ШВП при движении по неровным грунтовым и взволнованным водным поверхностям управлением характеристиками ШВП. *Сб. докл. VII науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2008»*. Москва, Изд-во ЦАГИ, 2008.
- [5] Долгополов А.А., Журихин Ю.П., Никифорова И.Г. Особенности характеристик управляемого разбега самолета с шасси на воздушной подушке. *Труды ЦАГИ*. Москва, Изд-во ЦАГИ, 1993, № 2070.
- [6] Долгополов А.А., Брагазин В.Ф., Захарченко Ю.А., Мерзликин Ю.Ю., Брусов В.А., Соколянский В.П., Гуськов В.Н. Разработка средств и законов управления ЛА с комбинированным шасси при рулежке, разбеге и

пробеге в условиях бокового ветра и при уклонах ВПП. *Сб. докл. VIII науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2010»*. Москва, Изд-во ЦАГИ, 2010.

Статья поступила в редакцию 10.09.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Наумов В.Н., Брусов В.А., Долгополов А.А., Чижов Д.А., Мерзликин Ю.Ю., Меньшиков А.С. Улучшение проходимости, плавности хода и управляемости летательных аппаратов и транспортных средств с регулируемым комбинированным шасси на воздушной подушке. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1302.html>

Наумов Валерий Николаевич — д-р техн. наук, профессор, ведущий 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



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



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: dolgopolov.aviafgup@gmail.com



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

Мерзликин 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



Improving cross-country ability, run smoothness and controllability of aircrafts and vehicles with controllable combined air-cushion undercarriage

© V.N. Naumov², V.A. Brusov¹, A.A. Dolgoplov¹, D.A. Chizhov²,
Yu.Yu. Merzlikin¹, A.S. Menshikov¹

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

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

The article describes a developed method of selecting and optimizing parameters of combined chassis complex control algorithms and aerodynamic aircrafts elements. This method allows decreasing aircrafts dynamic load during running by rough runway and provides airplane stability and controllability during take-off and landing in the conditions of cross-wind and slope of the runway. Preliminary calculations and experimental researches of chassis with controllable pressure in sections of air-cushion indicate that accelerations of aircrafts with such kind of undercarriage and appropriate algorithms could be reduced by 1.8 times. It becomes possible to use for take-off and landing water surface, prepared and unprepared ground surfaces, soft soil flat country. It is shown, that the control of run direction during take-off and landing in conditions of cross-wind and slope of the runway should be realized by airplane turn on balancing angle of glide. Automation of control under these conditions allows reducing side deviation down to 2.5 meter. To predict energy efficiency of aircrafts and vehicles with air-cushion chassis in wide range of changeable parameters conditions developed and verified math model. This model allows creating and fine-tuning algorithms of dividing the power between wheeled propeller and air-cushion system to provide the most efficient mode of objects motion.

Keywords: driving dynamics, the system of differential equations, the mathematical model, the disturbance irregularities, management, depreciation hour.

REFERENCES

- [1] Furungiev R.F., Ostanin A.N. *Upravlenie kolebaniyami mnogoopornykh mashin* [Managing fluctuations multisupport machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984.
- [2] Kotiev G.O., Sarach E.B. *Kompleksnoe podressorivanie vysokopodvizhnykh dvukhzvennykh gusenichnykh mashin* [Comprehensive progressirovanie high-mobility two-tier tracked vehicles]. Moscow, BMSTU Publ., 2009.
- [3] Dolgoplov A.A., Wisniewski G.A., Volostnykh V.N., Merzlikin Yu.Yu., Mitrofovich V.V., Maslov L.A., Zhuravlev Yu.F., Bannikov Yu.M., Guskov V.N., Tashkaev V.I., Bliznyuk A.M., Guskov A.V. *Amfibiyne apparaty ZAO Komven s mnogosektsionnym ograzhdeniem shassi na vozdushnoy podushke* [Amphibious vehicles CJSC Kommen with multiple-enclosure air-cushion undercarriage]. *Sbornik dokladov. VI Nauchnaya konferentsiya po gidroaviatsii "Gidroaviasalon-2006"* [Coll. Reports. VI Scientific conference on hydroaviation "Gidroaviasalon' 2006"]. Moscow, TsAGI Publ., 2006.
- [4] Dolgoplov A.A., Zakharchenko Yu.A., Brusov V.A., Guskov V.N., Lisin N.A., Merzlikin Yu.Yu., Morozov, B.P., Naumov V.N., Tashkaev V.I. *Snizhenie dinamicheskoy nagruzhennosti LA s ShVP pri dvizhenii po nerov-*

nym gruntovym i vzvolnovannym vodnym poverkhnostyam upravleniem kharakteristikami ShVP [Reducing the dynamic load of aircraft with air-cushion undercarriage when driving on uneven ground and excited water surfaces by running characteristics of the air-cushion undercarriage]. *Sbornik dokladov. VI Nauchnaya konferentsiya po gidroaviatsii "Gidroaviasalon'2008"* [Coll. Reports. VI Scientific conference on hydroaviation "Gidroaviasalon'2008"]. Moscow, TsAGI Publ., 2008.

- [5] Dolgoplov A.A., Zhurikhin Yu.P., Nikiforova I.G. Osobennosti kharakteristik upravlyaemogo razbega samoleta s shassi na vozdushnoy podushke [Particular characteristics of the controlled take-off of aircraft with air-cushion chassis]. *Trudy TsAGI — TsAGI Science Journal*, 1993, no. 2070.
- [6] Dolgoplov A.A., Bragazin V.F., Zakharchenko Yu.A., Merzlikin Yu.Yu., Brusov V.A., Sokolyansky V.P., Guskov V.N. Razrabotka sredstv i zakonov upravleniya LA s kombinirovannym shassi pri rulezhke, razbege i probege v usloviyakh bokovogo vetra i pri uklonakh VPP [Development of control means and laws for aircraft with combined chassis when taxiing, take-off and run under conditions of side wind and the slope of the runway]. *Sbornik dokladov. VI Nauchnaya konferentsiya po gidroaviatsii "Gidroaviasalon'2010"* [Coll. Reports. VI Scientific conference on hydroaviation "Gidroaviasalon'2010"]. Moscow, TsAGI Publ., 2010.

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 Department at Bauman Moscow State Technical University. Author of 300 publications in the field of transport machinery. e-mail: naumovvn@yandex.ru

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

Dolgoplov 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: dolgoplov.aviafup@gmail.com

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

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