
УПРАВЛЕНИЕ И НАВИГАЦИЯ

УДК 629.7.05

А. В. НЕБЫЛОВ, В. А. НЕБЫЛОВ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОТОМ ТЯЖЕЛОГО ТРАНСПОРТНОГО АППАРАТА С ЭКРАННЫМ ЭФФЕКТОМ

Описаны методы синтеза систем управления для большого экраноплана, проанализированы опыт и перспективы их развития.

Ключевые слова: управление полетом, маловысотный полет, морские волны, интеграция датчиков, проектирование систем управления.

Основные характеристики экраноплана. В последние годы произошли большие изменения в концепциях проектирования и использования экранопланов. Стали применяться современные средства автоматизации управления. Экраноплан — воздушное транспортное средство со специальными конструктивными особенностями, обеспечивающими возможность маловысотного полета при использовании экранного эффекта (WIG-эффекта). Эффект позволяет достичь существенного увеличения подъемной силы крыла и уменьшения аэродинамического сопротивления при движении вблизи подстилающей поверхности. В этом случае действие воздушной подушки между крылом и опорной поверхностью добавляется к обычному механизму формирования подъемной силы из-за различных скоростей воздушного потока над верхней и под нижней поверхностями крыла.

В полной мере использовать экранный эффект и обеспечивать высокие функциональные характеристики экранопланов позволяют следующие конструктивные особенности, отличающие экранопланы от самолетов:

- широкое крыло с малым коэффициентом удлинения, относительно низко присоединенное к корпусу, или конфигурация „летающее крыло“;
- концевые шайбы на крыльях, улучшающие аэродинамику крыла при движении у поверхности;
- развитое хвостовое оперение;
- гидродинамически совершенный корпус повышенной прочности.

Важными преимуществами экранопланов являются:

- отсутствие потребности во взлетно-посадочной полосе;
- возможность вынужденной посадки на воду;
- сниженные требования к надежности работы двигателей и возможность полной выработки их нормативного срока эксплуатации;
- экономия топлива при полете в экранном режиме;
- отсутствие необходимости герметичной кабины.

Наряду с преимуществами экранного эффекта есть и его отрицательное проявление, состоящее в таком перераспределении давления на поверхности крыла и аэродинамические управляющие поверхности, что усложняется обеспечение продольной статической устойчи-

ности аппарата. Это вместе с существенной зависимостью динамики аппарата от относительной высоты движения является важнейшим обстоятельством, которое следует учитывать при проектировании автоматической системы управления полетом, удовлетворяющей современным требованиям [1—5]. Естественное желание разработчиков экранопланов максимально использовать опыт создания авиационных автопилотов при глубоком исследовании проблемы дополняется пониманием существенной специфики экраноплана как объекта управления с очень узкой областью собственной устойчивости в пространстве параметров движения.

При высокой скорости движения, характерной для больших экранопланов, необходимо решать проблему предотвращения столкновения с транспортными средствами при дефиците времени для маневрирования из-за малого радиуса действия обзорной радиолокационной станции.

Проблема устойчивости. При полете вне зоны действия экранного эффекта экраноплан, подобно самолету, может иметь продольную устойчивость, если его центр тяжести находится перед аэродинамическим центром. При уменьшении угла тангажа и, следовательно угла атаки, отрицательное приращение аэродинамической силы, приложенной к центру давления, даст момент силы относительно центра тяжести, стремящийся увеличить угол тангажа, что демонстрирует продольную устойчивость аппарата.

В зоне действия экрана продольная устойчивость может быть нарушена, поскольку аэродинамическая сила зависит не только от угла атаки, но и от высоты движения. Кроме того, положение аэродинамического центра может измениться в зависимости от нескольких факторов под действием экрана. Когда высота уменьшается, фокус сдвигается назад из-за увеличения давления в задней кромке крыла при положительных углах атаки и сдвигается вперед — при нулевых и отрицательных углах атаки.

Несомненно, эффективное средство для расширения области устойчивости движения и даже формирования такой области для структурно неустойчивого экраноплана — использование специальных автопилотов. Первым экранопланом, оборудованным системой автоматического управления „Смена-4“ для демпфирования и стабилизации пяти главных параметров полета, был „Орленок“ со взлетным весом 140 тонн (рис. 1). Система была построена в 1978 г. [6]. Семь лет спустя автопилот „Смена-3“ был разработан для экраноплана „Лунь“ массой 380 тонн.



Рис. 1

Классификация экранопланов по массе и габаритам. В соответствии с габаритами и взлетной массой экранопланы разделяют на малые, средние и большие. Малые экранопланы массой до нескольких тонн и размером до десяти метров предназначены для перевозки от

1 до 8 пассажиров над реками и озерами. Средние экранопланы массой 10—50 т и размером в несколько десятков метров могут перевозить около 100 пассажиров над умеренно взволнованным морем. Большие экранопланы со взлетной массой более 100 т и размером более 50 метров могут перевозить сотни пассажиров над взволнованным океаном. Очень большие экранопланы массой более 1000 т могут также рассматриваться как перспективные, практически не имеющие ограничений в эксплуатации, связанных с погодой.

Основная идея настоящей работы заключается в том, чтобы показать существенное различие в подходах к проектированию малых и больших экранопланов.

Большие экранопланы принципиально не могут использоваться без совершенных автоматических систем управления. Основная часть малых экранопланов не имеет каких-либо средств автоматизации управления полетом из-за ограничений по стоимости и требований упрощенного обслуживания.

Многие фирмы разрабатывали различные виды малых экранопланов и выдвигали планы разработки большого экраноплана по той же аэродинамической схеме или близкой к ней, но ни один из планов не был реализован вследствие финансовых ограничений. Одна из важных причин — существенные трудности создания специального автопилота для экраноплана. Прямое применение какого-либо авиационного автопилота невозможно из-за отличной динамики аппарата, а также по ряду формальных требований ИКАО, в связи с чем должны быть созданы специальные датчики и системы датчиков, а также специальные законы управления для бортовых компьютеров. Это требует привлечения группы специалистов по автоматическому управлению, но они, как правило, не работают на малых предприятиях, которые производят малые экранопланы. Заказывать автопилот для экраноплана очень дорого (миллионы долларов), и для его разработки на специализированном предприятии требуется передать последнему полные данные о проекте экраноплана еще на начальной стадии. Как правило, малые и средние предприятия не допускают такой утечки информации о своих коммерческих проектах. Поэтому только довольно крупная фирма или консорциум специализированных фирм могли бы осуществить проект строительства большого экраноплана, что подтверждает опыт нижегородского „ЦКБ по СПК“.

Две особенности могли бы характеризовать три десятилетия, прошедшие с того времени. Коммерческие малые экранопланы были разработаны в нескольких странах, но серьезные попытки построить автоматическую систему управления движением для экранопланов не предпринимались. Рыночная конъюнктура требовала дешевых аппаратов, а средства автоматизации могли удорожить проекты.

Постепенно стало ясно, что современные средства автоматического управления должны устанавливаться и на коммерческие экранопланы. Автоматическая система управления должна разрабатываться параллельно с созданием самого экраноплана и определять его аэродинамические характеристики. Особенно важно, чтобы аппараты даже без запаса устойчивости можно было считать допустимыми при их высоком аэродинамическом качестве и минимальном потреблении топлива. Обеспечение устойчивости полета может быть возложено полностью на автоматическую систему управления, надежность и отказобезопасность которой должны быть гарантированы.

Стоимость автопилота для малого экраноплана мелкосерийного производства была оценена [7, 8] приблизительно в 70—100 тыс. долларов, и эта сумма лишь немного возрастает с увеличением массы аппарата (главным образом за счет более развитых силовых приводов). „Справедливая“ стоимость простого в строительстве 6—8-местного экраноплана составляет 250—400 тыс. долларов, и это делает невозможным включение требуемого автопилота в состав его оборудования. Поэтому установка автопилотов оправдана лишь на больших экранопланах.

Возможные разработчики автоматически управляемого экраноплана. Список возможных стран-разработчиков большого экраноплана может определяться, в частности, гео-

графическим местоположением и стратегическими интересами стран. Большие экранопланы должны летать на большие расстояния над морями и океанами, и внутриконтинентальным странам едва ли интересно развивать их. Важен и объем грузовых и пассажирских перевозок морским путем. Все это позволяет выделить группу стран, которые могли бы построить большие и сверхбольшие экранопланы в ближайшем будущем.

Россия имеет большой опыт в развитии экранопланов для ВМФ. В течение 25 лет Правительство Российской Федерации не поддерживало эту отрасль, но в 2009—2010 гг. появилась информация об изменении такой политики. Известное „ЦКБ по СПК“ им. Р. Е. Алексеева сменило владельца, и теперь компания „Радар ММС“ (Санкт-Петербург) является держателем 51 % акций ЦКБ и производит существенные инвестиции в это предприятие [9]. С привлечением многих заинтересованных организаций разрабатывается Концепция развития экранопланостроения в России. Реконструкция имеющихся проектов на основе современных технологий и создание новых цифровых систем для навигации и управления движением больших экранопланов — среди краткосрочных планов компании. Несколько других российских фирм также предполагают развивать экранопланостроение: ТАНТК им. Г. М. Бериева объявила проект создания большого экранолета Бе-2500 [10].

Китай достиг многого в развитии технологий экранопланов в течение последних 20 лет, когда у российской промышленности был трудный период. Использование российского опыта, прямая покупка некоторых проектов в России, привлечение российских специалистов помогли успешно построить такие китайские экранопланы, как МК, Swan, Tianxiang; существует проект большого экраноплана Chanhe-7 массой 1100 т. Китай, несомненно, имеет большие возможности применения экранопланов в островных районах Юго-восточной Азии. Но надежный китайский автопилот для экраноплана все еще не создан.

Япония давно проявляет интерес к развитию технологий построения экранопланов, но на данный момент этот интерес немного угас по нескольким причинам, включая трудности обеспечения регулярных полетов не очень больших экранопланов над поверхностью штормового моря и обеспечения безопасного движения столь скоростных транспортных средств в регионах с интенсивным судоходством. Проект аэрокосмического самолета с горизонтальным взлетом и посадкой, выполняемыми при помощи большого экраноплана [11], был приостановлен. Но в будущем интерес к большому экраноплану может появиться снова.

Южная Корея начала интенсивное развитие экранопланых технологий 20 лет назад и имеет хорошие достижения. После строительства нескольких малых аппаратов был разработан большой экраноплан в 300 тонн, способный перевозить 100 т груза со скоростью 250—300 км/ч. Попытка создать специальный автопилот была предпринята на последней стадии развития проекта. Корейское Морское министерство заявило, что сейчас, пока мировой рынок экранопланов не развит, транспортные аппараты с экранным эффектом в 2012 г. могут составить 10 % всемирного рынка морских перевозок (<http://www.korea.net>). По прогнозам министерства, Южная Корея может получить 20 % рынка перевозок экранопланами к 2015 г., и эта доля могла бы возрасти до 30 % в 2025 г. Принимая во внимание большие достижения Южной Кореи в развитии современного судостроения, к этим оценкам необходимо отнестись очень серьезно.

США имеют долгую историю развития экранопланов, но большинство проектов, включая Airfoilboat X-112 и Weinlandcraft, были неудачными в коммерческом плане. После появления большого экраноплана в советском ВМФ СССР Конгресс США обещал финансирование до 15 млрд долларов, чтобы создать экраноплан для американских сил быстрого реагирования. В 1993 г. делегация исследовательской группы ARPA посетила „ЦКБ по СПК“ и имела возможность познакомиться с российскими экранопланами „Орленок“ (в полете) и „Лунь“ [12].

В 2002 г. был анонсирован проект большого экраноплана „Пеликан Ультра“ (рис. 2) со следующими характеристиками [10, 12]: длина — 122 м, размах крыла — 152 м, высота — 6 м, полезный груз — 1400 т, взлетная масса — 2700 т, силовая установка — 8 турбовинто-

вых двигателей в 60—80 тыс. лошадиных сил, скорость полета — 445 км/ч, дальность полета 10—12 тыс. км. Его крейсерский режим полета должен выполняться на высоте 6—15 м над водой, со взлетом и посадкой на обычных взлетно-посадочных полосах. Разработчиком экраноплана „Пеликан Ультра“ объявлена фирма Боинг.

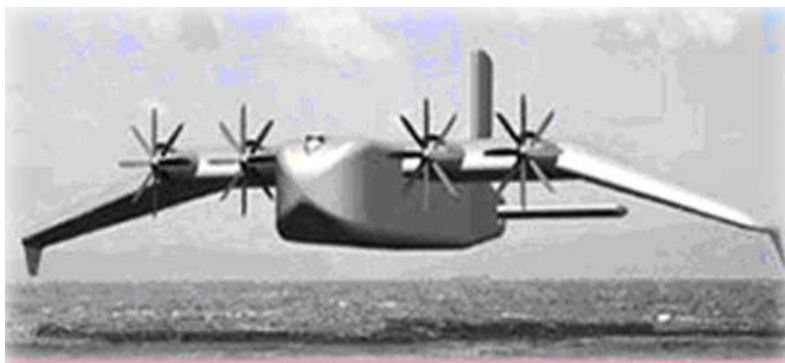


Рис. 2

Какой-либо детальной информации о продвижении в строительстве этого экраноплана не опубликовано; очевидно, что столь большой экраноплан, особенно без высоко поднятого хвостового стабилизатора, должен быть оборудован совершенной автоматической системой управления, и Боинг, конечно, разрабатывает такую систему, имея превосходный опыт в создании автопилотов для тяжелых самолетов.

Специфические проблемы автоматического управления экраноплана. Технологии создания малых и больших экранопланов весьма различаются.

1. Основной конструкционный материал для большого экраноплана — легкие металлические сплавы и композиционные материалы. Малые недорогие экранопланы строят главным образом из пластмассы. Это требует других конструктивных схем, иных методов проектирования (включая методы прочностного и аэродинамического анализа) и другого технологического оборудования для производства.

2. Для больших экранопланов используется большее число элементов управления и другая стратегия управления. Следующие пять параметров движения должны быть автоматически управляемыми: высота полета, углы тангажа, крена и рыскания, угол атаки, воздушная скорость. Основные органы управления большого экраноплана: руль высоты, руль направления, закрылки, элероны или флаппероны, контроллер тяги двигателя. Большинство органов управления обычно триммированы.

3. Упругость корпуса большого экраноплана должна быть принята во внимание при оптимизации законов управления движением. Модели упругости описаны в работе [13]. Как правило, рассматривают три моды колебаний. Совершенные модели позволяют выработать рекомендации по построению законов управления и размещению чувствительных и управляющих элементов на корпусе транспортного средства. Желательно включение узкополосных режекторных фильтров в контур управления.

4. Собственные частоты большого экраноплана как объекта управления значительно меньше, чем малого. Это приводит к дополнительным трудностям в обеспечении высококачественного управления полетом. Как правило, колебательные звенья в модели большого экраноплана имеют меньшие собственные частоты и коэффициенты демпфирования. Колебательная, или апериодическая, неустойчивость динамической модели большого экраноплана — обычное явление, и только совершенная система стабилизации и демпфирования может обеспечить продольную устойчивость.

5. Для большого экраноплана существенный угол крена более нежелателен, чем для малого. Именно поэтому не элероны, а руль направления главным образом используется при

повороте. В действительности при выполнении поворота нужно рассматривать координированное управление с использованием практически всех элементов управления.

6. Поскольку большой экраноплан должен летать и в штормовом море, крупные волны могут влиять на управление полетом. Адекватные модели волновых возмущений рассмотрены в работах [10, 13]. При управлении высотой движения желательнее избежать двух крайностей: не стабилизировать жестко абсолютную высоту относительно гипотетического среднего уровня возмущенного моря и не отслеживать каждую небольшую элементарную волну. Это является специфической проблемой оптимизации закона управления движением экраноплана в продольной плоскости [1, 5].

7. Высокая цена автопилота для малого экраноплана часто препятствует его успешному выходу на рынок скоростных транспортных средств. Для большого экраноплана стоимость автопилота — лишь малая часть общей стоимости транспортного средства. Самое совершенное бортовое оборудование и мощные надежные компьютеры должны быть использованы при построении системы автоматического управления движением, которая должна быть адаптивной и обеспечивать требуемое качество управления во всех рассматриваемых режимах полета.

Оптимизация законов управления. Проектирование автоматических систем управления движением для экранопланов может включать следующие этапы.

1. Создание модели летательного аппарата для экранного режима полета на основе всестороннего анализа аэродинамических особенностей экраноплана, распределения масс, особенностей балансировки, эффективности элементов управления и размещения этих элементов и датчиков, типов и количества датчиков и многих других существенных факторов. Модель экраноплана подобна модели самолета, но большинство коэффициентов зависит от высоты полета.

2. Автоматическая линеаризация уравнений, описывающих экраноплан, относительно прямолинейной траектории полета на установленной типовой высоте.

3. Упрощенное разделение многомерной системы управления экранопланом на несколько независимых линейных контуров регулирования.

4. Оценка управляемости и наблюдаемости для упрощенной линейной модели экраноплана.

5. Синтез по возможности простого закона управления для каждого отдельного контура регулирования. ПИД-регулятор может использоваться в простейшем случае, поскольку он хорошо соответствует доступному набору датчиков [1, 2]. Исследование робастности этих законов к вариациям параметров.

6. Предварительное исследование влияния волновых и ветровых возмущений на экраноплан (приложенных к его крылу и корпусу, а также искажающих выходные сигналы датчиков и систем датчиков). Совершенствование фильтров в измерительных каналах, исследование преимуществ оптимальных фильтров над простыми с учетом неполноты информации об особенностях возмущений.

7. Исследование влияния нежесткости корпуса экраноплана на каналы системы управления. Совершенствование простых законов управления в контурах, для того чтобы обеспечивать демпфирование недопустимых мод колебаний. Применение оптимальных методов фильтрации.

8. Объединение отдельных контуров управления в многомерную линейную систему управления со взаимодействием между каналами. Всестороннее исследование этой системы на основе использования MATLAB и других эффективных систем программного обеспечения.

9. Ввод главных нелинейных звеньев в каналы управления, составление нелинейных дифференциальных уравнений таких каналов для стационарного случая. Моделирование и исследование влияния нелинейности на показатели качества управления.

10. Моделирование системы управления с полной динамической моделью экраноплана. Исследование качества и устойчивости управления в требуемом диапазоне высот. Изучение чувствительности к изменению параметров модели экраноплана. Разработка адаптивных законов управления.

11. Моделирование и исследование взлета экраноплана с воды. Разработка законов управления для взлета.

12. Создание специальных законов управления для приземления, координированного поворота и изменения высоты, включая режимы предотвращения столкновений с препятствиями. Моделирование касания концом крыла гребня волны при полете в экранном режиме для оценки возможности аварии (переворачивания) аппарата.

13. Моделирование неполадок исполнительных элементов системы управления. Разработка алгоритмов реконфигурации системы управления.

14. Идентификация недопустимых комбинаций значений параметров полета (прежде всего для высоты, воздушной скорости и угла атаки), разработка алгоритмов их исключения.

15. Постепенное подключение все большего числа каналов автоматического управления для экспериментального образца экраноплана, с отладкой и эксплуатационной доводкой законов управления и элементов во время испытательных полетов.

Конечно, некоторые изменения в последовательности названных этапов возможны для разных случаев проектирования.

Синтез законов управления может быть выполнен по нескольким принятым критериям качества, основные — обеспечение допустимых значений ошибок управления в различных режимах полета и допустимых запасов устойчивости по амплитуде и фазе. Эффективно отфильтрованные оценки ошибок управления летательным аппаратом, линейная и угловые скорости, а также волновые и ветровые возмущения должны использоваться при формировании сигналов управления.

Автоматизация взлета и приземления экраноплана — отдельная сложная проблема, связанная с координированным управлением по нескольким каналам, возможно включая и канал поворота тяги двигателей.

Полученные текущие данные о поле волновых возмущений могут использоваться для адаптации главных контуров управления движением и реализации принципа комбинированного управления по ошибке и возмущению. Это позволяет повысить качество управления движением. Однако основную трудность в построении канала управления движением над возмущенной водной поверхностью представляют вычисления возмущающей силы и моментов, приложенных к экраноплану. При двумерных морских волнах эта задача решается достаточно успешно, но в общем случае трехмерных волн необходимо использовать приближения. Однако положительный эффект можно обеспечить в любом случае.

Разработанная в МИПАКТ ГУАП система измерения позволяет отслеживать профили морских волн в трех точках, соответствующих точкам установки высотомеров на носу и на концах крыла, с точностью 10 см при пятибалльном морском волнении [3, 8]. Проблема автоматической оценки генерального направления распространения морских волн с использованием выходных сигналов трех высотомеров также решена, что важно для оптимизации режима захода на посадку и приводнения.

Вместо радиовысотомеров могут использоваться фотометрические устройства, создающие на водной поверхности рисунок в монохроматическом свете, и цифровые фотокамеры, воспроизводящие текущие изображения поверхности. Специально разработанные алгоритмы обработки полученных изображений позволяют точно оценивать высоту полета и морское волнение [14]. Это оборудование будет более дешевым по сравнению с радиовысотомерами, но надежность в полном спектре возможных условий применения все еще является предметом исследования.

Заключение. Требуемые эксплуатационные характеристики большого экраноплана могут быть достигнуты только при использовании новых возможностей совершенствования систем навигации и управления движением на основе современной теории управления и мощных бортовых компьютеров. Алгоритмы управления и некоторые аппаратные средства автоматических систем управления для таких транспортных средств отличаются от авиационных и требуют специального исследования и проектирования, имеется существенное различие в принципах проектирования малых и больших экранопланов. Экранопланы, после решения ряда проблем теории и практики проектирования, могут претендовать на существенный сектор рынка высокоскоростных транспортных средств.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований по проекту № 09-08-00529.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nebylov A. V.* Principles and systems of heavy WIG-craft flight control // 18th IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace. Nara, Japan, 2010.
2. *Nebylov A. V.* WIG-Flight Automatic Control Principles, Systems and Application Advantages // 15th IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace. Forli, Italy, 2001. P. 542—547.
3. *Nebylov A. V.* Controlled flight close to rough sea: Strategies and means // 15th IFAC World Congress. Barcelona, 2002. Vol. 8a.
4. *Nebylov A. V., Ovodenko A. A., Sharan S.* Wing-in-Ground vehicles Perspective & Trends for Development, Modern concepts of design, automatic control & application // “Aero India-2009”. Intern. Seminar. 2009.
5. *Небылов А. В.* Измерение параметров полета вблизи морской поверхности. СПб: Изд-во ГААП, 1994. 308 с.
6. *Nebylov A. V., Wilson P.* Ekranoplane — Controlled Flight Close to Surface. UK: WIT-Press, 2002. 320 p.
7. *Диомидов В. Б.* Автоматическое управление движением экранопланов. СПб: ГНЦ РФ-ЦНИИ „Электроприбор“, 1996. 204 с.
8. *Denisov V., Nebylov A. V., Trofimov Y. V.* Commercial Approach to the Problems of Large Russian Ekranoplanes Development // GEM-2000. Intern. Conf. Proc. St.-Petersburg, 2000. P. 32—39.
9. *Nebylov A. V.* et al. Sea wave parameters, small altitudes and distances measurers design for motion control systems // AGARD-NATO CP-556. Dual Usage of Military and Commercial Technology on Guidance and Control. Neuilly-sur-Seine, France, 1995. P. 201—212.
10. *Мозговой А.* Будем ждать возвращения „Каспийского монстра“ // Национальная оборона. 2009. № 9. С. 66—68.
11. *Кедров И.* Тысяча тонн за один рейс // Военно-промышленный курьер. 2010. Т. 37.
12. *Tomita N., Nebylov A. V.* et al. Performance and Technological Feasibility of Rocket Powered HTHL-SSTO with Take-off Assist // Acta Astronautica. 1999. Vol. 45, N 10. P. 629—637.
13. *Amrhein F.* Boeing Pelican. 2009 [Electronic resource]: <http://wapedia.mobi/en/Boeing_Pelican>.
14. *Brodsky S. A., Nebylov A. V., Panferov A. I.* Modeling, Simulation and Design of the Stabilization System for Complex Flexible Aerospace Vehicles // 3rd European Conference for Aero-Space Sciences (EUCASS). Versailles, France, 2009.

Сведения об авторах

Александр Владимирович Небылов — д-р техн. наук; Международный институт передовых аэрокосмических технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения; директор;
E-mail: nebylov@aanet.ru

Владимир Александрович Небылов — Международный институт передовых аэрокосмических технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения; научный сотрудник;
E-mail: vladnebylov@rambler.ru

Рекомендована ГУАП

Поступила в редакцию
04.04.11 г.