

## **Проектирование и комплексное математическое моделирование судна на воздушной подушке для регионов Севера, Сибири и арктического континентального шельфа**

© С.Д. Попов, С.Н. Чувашев

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

*Представлена разработанная в Научно-производственном центре «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана комплексная математическая модель базового уровня для исследования движения транспортного средства на воздушной подушке, позволяющая на этапе проектирования учесть неочевидные нелинейные взаимодействия между рабочими и сопутствующими процессами, а также уменьшить вероятность ошибок на системном уровне. Рассмотрен вариант несущего комплекса, в котором воздушная подушка создается шестью независимыми коническими гибкими ограждениями с малыми углами при вершинах.*

**Ключевые слова:** *транспортные комплексы, транспортные средства на воздушной подушке, комплексная математическая модель, многокамерное гибкое ограждение, арктические регионы, арктический шельф.*

Транспортные суда на воздушной подушке (ТСВП) являются уникальными транспортными средствами, совокупность технических качеств которых ставит их в исключительное положение при формировании транспортного комплекса российских регионов Севера, Сибири, арктического континентального шельфа.

В нашей стране накоплен огромный опыт создания ТСВП. Примерно с 1960 г. в течение 30 лет проводились интенсивные исследовательские и конструкторские работы, благодаря чему в конце этого периода мы занимали лидирующее положение в мире как по составу ТСВП, так и по их ходовым, мореходным и амфибийным качествам. Однако с начала 1990-х годов в России практически прекратилось проектирование и строительство крупных ТСВП, а также свернулись разработка и производство малотоннажных и среднетоннажных (8...10 т) коммерческих ТСВП. Как следствие, подходы к проектированию и исследованиям ТСВП фактически остались на уровне 20-летней давности, хотя создание ТСВП нового поколения, обладающих существенно более высокими характеристиками поддержания аппарата, остойчивости, ходкости и мореходности, остается актуальной проблемой. Решение этой

проблемы возможно, в том числе и путем разработок новых несущих комплексов ТСВП. Для обоснованного формирования оптимальной компоновки ТСВП, обеспечения его ходовых и амфибийных качеств, повышения ресурса, а также уменьшения стоимости проектирования необходимо располагать прежде всего соответствующими проблемно-ориентированными математическими моделями.

В наиболее характерных случаях движение осуществляется под действием движущей силы, формируемой тяговыми аэродинамическими движителями. Управление движением аппарата по курсу, крену и тангажу обеспечивается дополнительными устройствами аэродинамического типа. При этом точное траекторное управление (позиционирование аппарата относительно заданной траектории движения) затруднено даже в случае непрерывного контакта гибкого ограждения с опорной поверхностью.

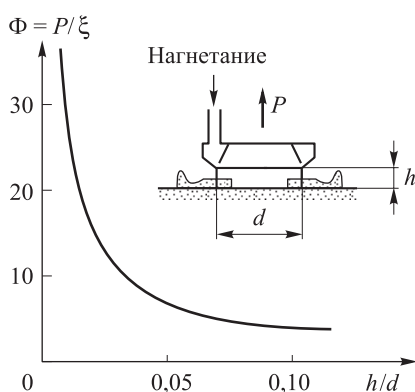
Особенностью ТСВП для регионов Севера, Сибири и арктического континентального шельфа является следующее обстоятельство: эти машины планируется эксплуатировать не столько над открытой водной поверхностью, как это ранее традиционно было принято для ТСВП, сколько над ледяными, заснеженными, заболоченными и другими характерными для данных регионов участками суши, а также в холмистой местности [1]. В этих условиях гидродинамическим сопротивлением и его отдельными компонентами зачастую можно пренебречь (например, при движении по твердым опорным поверхностям). В холмистой местности, очевидно, критическими будут технические возможности ТСВП по преодолению затяжных уклонов, а также его ресурсы по обеспечению курсовой стабилизации при наличии крена и одновременном дестабилизирующем воздействии боковой ветровой нагрузки.

В основном результаты большинства исследований относятся к аппаратам так называемого классического типа, оборудованным гибким ограждением и предназначенным для передвижения над различными водными поверхностями. В последнее время появились углубленные исследования амфибийных аппаратов для периодического использования на участках слабых грунтов и на заснеженных поверхностях, оборудованных надувными ограждающими баллонами, которые называют также баллонетами, или скегами.

Развернутые исследования многокамерных систем формирования воздушной подушки (так называемые гибкие ограждения системы Бертена) в открытых литературных источниках практически не описаны. В то же время имеются сведения о вполне успешном опыте применения при движении по участкам с крупными неровностями машин подобного типа, оборудованных движителем с частичной разгрузкой, а также об опыте эксплуатации ТСВП этого типа достаточно больших размеров.

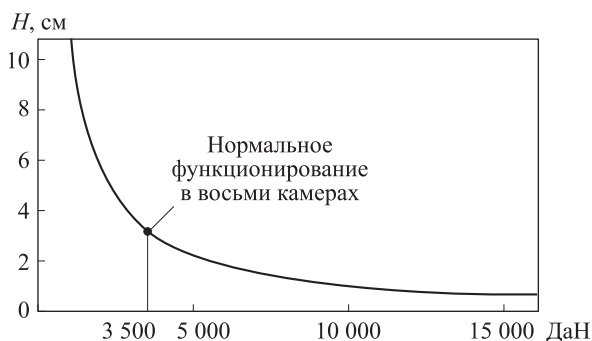
Следуя подходу Ж. Бертена [2], параметром, позволяющим объективно сравнивать между собой различные аппараты, можно считать относительную высоту полета, определяемую как отношение высоты свободного пространства между краем платформы и землей и ее диаметра. Другим критерием эффективности подъемной системы можно считать отношение подъемной силы, действующей на платформу при близком к ней расположении подстилающей поверхности, к подъемной силе, действующей на эту же платформу при отсутствии подстилающей поверхности и при том же расходе воздуха, создаваемом нагнетательным комплексом (коэффициент усиления опорной поверхности). Зависимость указанного параметра от относительной высоты полета по данным Ж. Бертена приведена на рис. 1, из которого видно, что с практической точки зрения для гибкого ограждения этого типа представляют интерес только достаточно малые значения относительной высоты полета, так как при  $\tilde{h} = 0,001$  параметр  $\Phi$  достигает 30, при этом для  $\tilde{h} = 0,05$  параметр  $\Phi$  не превышает значения 7,0...8,0. Кроме того, ТСВП на воздушной подушке эффективны только в тех случаях, когда их размеры достаточно велики по сравнению с зазором между ограждением ВП и подстилающей поверхностью. Важно отметить, что способность ТСВП к преодолению препятствий оказывается тем ниже, чем выше их эффективность, в частности ТСВП с эффективными системами поддержания полета обладают низкой подвижностью на побережье и в других аналогичных условиях. Так, при отсутствии контакта с опорной поверхностью угол склона, доступного для передвижения аппарата, будет невелик (например, для  $\tilde{h} = 0,001$  — не более 3 %).

В процессе исследований, проведенных компанией SEDAM, было установлено, что гибкое ограждение, выполненное в виде конической колоколообразной камеры, позволяет весьма эффективно использовать



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента усиления опорной поверхности от относительной высоты полета (по данным Ж. Бертена)

эффект от влияния подстилающей поверхности. При этом «простейший колокол» имел ряд принципиальных недостатков, прежде всего необходимость применять ограждение, в 20–30 раз превышающее по размерам высоту преодолеваемых препятствий (для преодоления простейших барьеров требовалось применять ограждение диаметром 50...60 м), а также отсутствие естественной устойчивости платформы. Результатом работы по устранению этих недостатков явилась «мультиколокольная схема» ограждения воздушной подушки (рис. 2). Испытания показали, что эта схема работоспособна при очень небольших значениях относительной высоты полета (около 1 % и менее), поэтому удельная мощность, необходимая для обеспечения полета, может находиться в пределах 15...20 л.с. на 1 т полной массы и даже меньше. Аппарат преодолевает препятствия очень легко при условии, что их длина сопоставима с длиной ограждения, причем положение платформы относительно опорной поверхности поддерживается достаточно стабильно. Независимость питания «колоколов» воздухом позволяет им воспринимать кратковременные 2- и 3-кратные перегрузки.



**Рис. 2.** Зависимость полной подъемной силы от высоты полета ТСВП для 8-камерной ВП [2]

Однако эта схема имеет ряд недостатков, главный из которых — уменьшение эффективной площади воздушной подушки. Для преодоления этого недостатка предлагалось много конструкций и принципиальных схем, но удовлетворительное компромиссное решение найдено не было, а после ликвидации компании SEDAM работы в данном направлении прекратились.

На сегодняшний день традиционным и основным способом исследования процессов движения ТСВП остается физический модельный эксперимент. Но, как хорошо известно, методы физического модельного и натурного экспериментов имеют существенные недостатки в части детального изучения работы элементов ТСВП при действии реальных нагрузок (высокая стоимость, длительность, неполная информативность,

проблемы переноса результатов на натурные масштабы [3]). На начальных этапах проектирования возможны значительные изменения формы корпуса аппаратов, а каждое изменение приводит к новой серии модельных испытаний, значительным затратам времени на создание модели и проведение испытаний в бассейне и аэродинамической трубе.

На этапе проектирования, особенно на начальных стадиях в рамках первых проектных итераций, целесообразно использовать комплексные математические модели, включающие несколько подсистем разрабатываемого изделия и описывающие одновременно целый ряд аспектов разнородных рабочих и сопутствующих процессов. Это позволяет учесть неочевидные нелинейные взаимодействия между такими процессами и уменьшить вероятность ошибок на самом общем системном уровне. Кроме того, при интенсивном развитии бортовых вычислительных средств становится реальным решение задачи управления движением объектов и функционированием их составных частей такого уровня сложности, который ранее был совершенно недоступен для технической реализации. Эти обстоятельства делают актуальными разработку математических моделей, предназначенных для функционирования в составе бортовых систем автоматического управления безопасным движением аппаратов.

Для проведения комплексных междисциплинарных вычислений на стадиях концептуального проектирования предпочтительно использование так называемых базовых математических моделей — моделей, основанных на алгебраических и дифференциальных уравнениях, опирающихся на точные законы сохранения, но использующих и полуэмпирические закономерности. Такие закономерности основаны на обработке большого массива экспериментальных данных. В исследованных режимах они часто дают результаты даже более точные, чем подробные 3D-вычисления, погрешности которых связаны с неточностью описания турбулентных течений, технической сложностью разрешения пограничных слоев, численными эффектами и проч.

Для ТСВП известны упрощенные модели движения базового уровня, предназначенные для выполнения начальных проектных расчетов, в значительной части — для отработки систем управления. При этом в большинстве случаев рассматриваются только ТСВП традиционного типа, не оборудованные активными или пассивными контактными опорами, т. е. обладающие ограниченными возможностями при движении по суше.

При недостаточной точности и надежности какого-либо блока (например, из-за его новизны) следует уточнять методики, алгоритмы и программы реализации каждого из блоков в отдельности, например на основе натуральных или модельных экспериментов. Большие перспек-

тивы открываются при применении для этого вычислительных экспериментов в подробных 3D-постановках, эффективность которых быстро повышается в связи с прогрессом в создании программных вычислительных комплексов и высокопроизводительных компьютеров. В последние годы для ТСВП проведены успешные вычислительные эксперименты для отдельных подсистем.

Следует отметить, что создание комплексных моделей на основе 3D-постановок в настоящее время практически невозможно, в частности, из-за больших различий в характерных временах (например, доли миллисекунды в движителях и десятки секунд при маневрах). Кроме того, для этого необходимо подробно задавать многочисленные характеристики узлов и агрегатов, облик которых еще не определен. Как правило, подробная 3D-постановка даже для одного агрегата сильно утяжеляет комплексную модель; целесообразно рассчитывать многомерные базы данных для основных параметров и при расчетах по комплексной модели проводить интерполяцию.

Таким образом, для создания ТСВП целесообразно разработать комплексную математическую модель, описывающую на уровне базовых математических моделей во взаимодействии такие аспекты, как динамика движения, аэро- и гидродинамика формирования сил сопротивления, поверхность и др., а также процессы в двигателях:

- маршевых движителях (обеспечивающих движение вперед);
- управляющих элементах (повороты);
- гибком ограждении (ГО);
- нагнетателях (создающих в ГО повышенное давление).

Результаты вычислительных экспериментов следует учитывать при принятии проектных решений. При последовательной конкретизации тех или иных подсистем проектируемого ТСВП следует уточнять соответствующие программные блоки, для чего можно применять и физические (модельные, натурные), и вычислительные эксперименты с подробным описанием процессов. Расчеты по уточненной комплексной модели должны использоваться при поиске оптимальных соотношений проектируемых параметров. Указанный итерационный процесс может продолжаться и после создания ТСВП для разработки его модификаций.

В настоящее время такие работы ведутся в Научно-производственном центре «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. К сегодняшнему дню разработана комплексная математическая модель базового уровня. Рассмотрен возможный вариант несущего комплекса, в котором воздушная подушка создается шестью независимыми коническими гибкими ограждениями с малыми углами при вершинах. Предполагалось, что с каждой камерой аэродинамически связан аксиальный нагнетатель, а маршевый рулевой комплекс содержит два аэродинами-

ческих винта, за которыми размещены аэродинамические рули из вертикально расположенных профилированных пластин.

Для примера опишем базовую математическую модель рабочих процессов в одноступенчатом нагнетателе аксиального типа. Для ее создания применялась оригинальная методика, основанная на канальном приближении [4–7]. Большое внимание уделялось корректному (в пределах одномерного канального приближения) теоретическому описанию газодинамических процессов на основе общих балансовых соотношений [8, 9], отражающих сохранение массы, импульса и энергии. Учитывались потери из-за влияния вязкости, нерасчетного угла входа и выхода, протекание в щелях и др., при этом применялись полуэмпирические соотношения [5, 10–12].

Предполагалось, что на входе в нагнетатель известны давление, температура газа и массовый расход, а скорость потока на входе параллельна оси вращения колеса. Задавались параметры конструкции, влияющие на рабочие процессы (углы, размеры, профили лопаток и проч.). По характеристикам потока, набегающего на рабочее колесо, определялись модуль и направление относительной скорости, число Маха набегающего потока во вращающихся координатах рабочего колеса, угол входа потока в каналы рабочего колеса и температура торможения. Далее находились эффективное критическое сечение канала, число Маха на выходе и остальные параметры потока, в том числе давление торможения в предположении, что осевая составляющая скорости восстанавливается, а азимутальная диссипирует. Возникающие при этом трансцендентные уравнения решались итерационным способом.

В данном случае описание общей динамики ТСВП как трехмерного твердого тела построено по традиционному подходу. Движение управляется изменением углов поворота рулей и лопаток винта, мощностью на валу нагнетателей и движителей, на него воздействуют силы аэродинамического сопротивления, а при движении по воде — еще и гидродинамического сопротивления. При движении ТСВП над сушей могут проявляться эффекты иного характера, связанные с взаимодействием ГО с неровной опорной поверхностью.

Моделируемый маршево-рулевой комплекс (МРК) аэродинамического типа включал два аэродинамических винта, за которыми размещены аэродинамические рули из расположенных вертикально профилированных пластин. Учитывалось также, что перед МРК находятся палубные постройки, аэродинамическая тень от которых создает неоднородность набегающего воздушного потока. Разработанная оригинальная методика основана на теории винта и крыла [13–19] и позволяет в базовом приближении рассчитать все основные характеристики МРК с учетом движения ТСВП, бокового ветра, закрутки потока, управ-

ляемого изменения углов положения лопастей винта и профилей рулей, аэродинамической тени от конструкции перед винтом и др.

Моделирование маршевого двигателя в общем случае проводится на основе данных о его универсальной характеристике (в первом приближении в расчете использовалась его внешняя скоростная характеристика).

Гибкое ограждение рассматривается как набор элементов, меняющих форму и положение независимо друг от друга. Для каждого элемента рассчитывается истечение воздуха через щель между ограждением и поверхностью, причем в случае податливости поверхности вносятся эмпирические поправочные коэффициенты [20].

Как известно, многие проблемы ТСВП связаны с нелинейными свойствами гибкого ограждения. По ограждениям так называемого классического типа имеется определенное количество исследований, позволяющих проводить поиск адекватных конструктивных решений, дающих возможность снижения опасности эффектов подлома, затягивания и повреждения ограждения при движении ТСВП по опорным поверхностям с крупными неровностями. По многокамерным схемам нет достаточно полных исследований поведения конусообразных ограждений в этих условиях. В то же время есть сведения о том, что реальные ограждения этого типа не всегда удовлетворительно ведут себя при большом волнении воды и движении по поверхностям с выраженными неровностями рельефа. Это требует рационального проектирования и конструирования камерного ограждения на основе детального представления о его рабочих процессах.

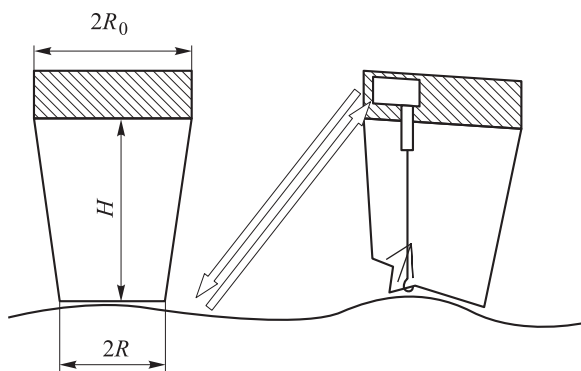
Для решения этих проблем на этапе математической постановки задачи были разработаны подробные 3D-модели гибкого ограждения многокамерного типа.

В общих чертах расчетная схема выглядит следующим образом. Имеется элемент гибкого ограждения в виде суженного усеченного конуса с верхним основанием радиуса  $R_0$ , нижним основанием радиуса  $R_1$  и высотой  $H$ , изготовленного из сминающегося нерастяжимого материала. Внутри конуса создается давление  $P_{\text{int}} = P_{\text{int}}(t)$ , внешнее давление  $P_0$ . Предполагается, что каждый конус оборудован индивидуальным управляемым нагнетателем (рис. 3).

Конус двигается вдоль опорной поверхности (ландшафта), заданного функцией  $S = S(t)$ . Если конус касается поверхности, на него действует сила трения, препятствующая движению.

Оболочки, характерные для ограждений ТСВП, практически нерастяжимы. Для удобства вычислений вводится модельный эффективный конечный модуль упругости и соответствующая сила упругости. Значение эффективных параметров выбирают из компромисса между вре-





**Рис. 3.** Схема управляемого ГО камерного типа, движущегося по неровной опорной поверхности

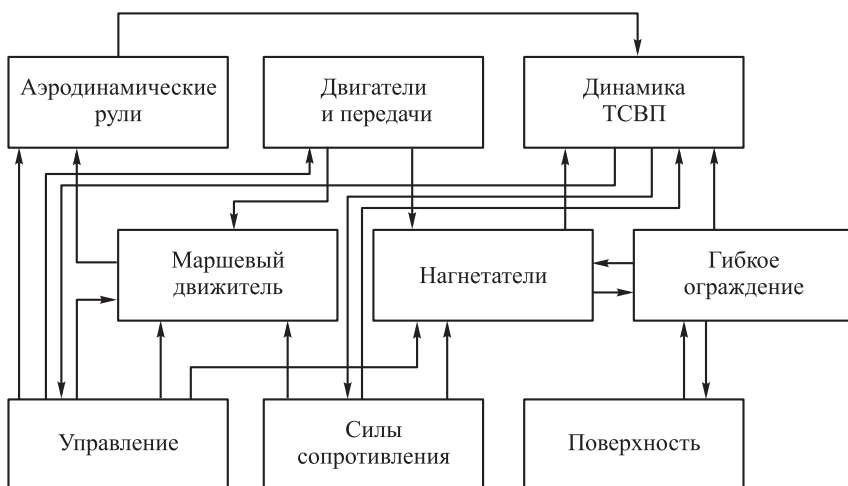
менем расчета и точностью результатов. Учитывается конечная изгибная упругость оболочки, возвращающий момент пропорционален изменению двумерной кривизны поверхности, что позволяет, в частности, учитывать ребра жесткости, локальные усиления в местах прикрепления тяг и т. п.

Для конуса граничные условия сверху задаются положением центра нагнетателя (он же центр основания конуса, нагнетатель считаем плоским) и ориентацией (два числа: например углы Эйлера). Поскольку конус жестко связан с нагнетателем, положение его верхнего основания относительно центра нагнетателя постоянно. Граничные условия снизу обусловлены отсутствием составляющей силы изгиба, нормальной к границе.

Если расчетная поверхность на данном шаге «проникает» сквозь рельеф, то в модели эта ее часть «укладывается» на рельеф. При этом возникает и начинает действовать соответствующая сила трения.

Поверхность представляется в виде прямоугольной лагранжевой сетки. Узлы соединены между собой ребрами. Узел  $(i, j)$  обладает массой  $m_{i,j}$ , элементарной площадью  $\sigma_{i,j}$ . Коническая (вначале) поверхность описывается  $N_z + 1$  слоями, каждый из которых состоит из  $N_\phi$  узлов. Самый верхний слой закреплен. Для описания поверхности требуется  $N_\phi \times N_z$  переменных.

Некоторые подпрограммы, реализующие указанные математические модели частных аспектов функционирования ТСВП, писались на  $C^{++}$  и отлаживались отдельно. Они объединялись в комплексную математическую модель (рис. 4) путем автоматического создания общего исходного файла на  $C^{++}$ , включающего оптимизированные средства решения дифференциальных уравнений (RADAU5 и др.). Учитывались динамика движения ТСВП в целом, управление ТСВП, работа двигателей и трансмиссии, маршевые движители и рули, нагнетательный



**Рис. 4.** Информационные потоки в комплексной модели

комплекс, ГО и воздушная подушка, подстилающая поверхность, силы сопротивления движению (в том числе аэродинамика корпуса ТСВП).

В данном случае комплексная математическая модель была реализована применительно к ТСВП с гибким ограждением, выполненным по системе Ж. Бертена. В целом же были разработаны физическая и математическая постановки комплексной математической модели для ТСВП, а также разработан алгоритм вычислений, что обеспечивает методологическую основу разработки концептуальных проектов амфибийных ТСВП перспективных типов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шляхтенко А.В., Цымляков Д.Е. Сила воздуха. ОСК. *Строим флот сильной страны*, 2011, № 4(8).
- [2] *Conférence prononcée par Jean BERTIN le 23.01.63 devant les groupes X-Automobile et X-Aviation*. [http://aer.nav.free.fr/Coussin/M\\_Coussin.html](http://aer.nav.free.fr/Coussin/M_Coussin.html)
- [3] Туманин А.В. *Моделирование статике и динамики гибкого ограждения баллонетного типа амфибийного судна на воздушной подушке*. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород: ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», 2012.
- [4] Шерстюк А.Н. *Насосы, вентиляторы, компрессоры*. Москва, Высш. шк., 1972, 343 с.
- [5] Костюк А.Г., Фролов В.В., ред. *Турбины тепловых и атомных электрических станций*. Москва, МЭИ, 2001, 488 с.
- [6] Boyce M.P. *Gas turbine engineering handbook*. Boston, Elsevier, 2006, 955 p.; Ingram G. *Basic concepts in turbomachinery*. Ventus Publishing ApS, 2009, 144 p.
- [7] Абрамович Г.Н. *Прикладная газовая динамика*. Ч. 1. Москва, Физматгиз, 1991, 600 с.
- [8] Абрамович Г.Н. *Прикладная газовая динамика*. Ч. 2. Москва, Физматгиз, 1991, 304 с.
- [9] Черный Г.Г. *Газовая динамика*. Москва, Наука, 1988, 424 с.

- [10] Ainley D.G. and Mathieson G.C.R. *An examination of the Flow and Pressure Losses in Blade Rows*. R. & M., London, Her Majesty's Stationery Office, 1955, no. 2891.
- [11] Ainley D.G. and Mathieson G.C.R. *An examination of the Flow and Pressure Losses in Blade Rows*. R. & M., London, Her Majesty's Stationery Office, 1957, no. 2974.
- [12] Moustapha S.H., Sjolander S.A., Benner M.W. Influence of leading-edge geometry on profile losses at off-design incidence: Experimental results and an improved correlation. *ASME 95-GT-289*, 1995.
- [13] Александров В.Л. *Воздушные винты*. Москва, Оборонгиз, 1951.
- [14] Кравец А.С. *Характеристики воздушных винтов*. Москва, Оборонгиз, 1941.
- [15] Ветчинкин В.П., Поляков Н.Н. *Теория и расчет воздушного гребного винта*. Москва, Оборонгиз, 1940.
- [16] Шайдаков В.И., Маслов А.Д. *Аэродинамическое проектирование лопастей воздушного винта*. Москва, МАИ, 1995, 34 с.
- [17] Шайдаков В.И. *Аэродинамический расчет вертолета*. Москва, МАИ, 1988.
- [18] Юрьев Б.Н. *Аэродинамический расчет вертолета*. Москва, Оборонгиз, 1956.
- [19] Sparenberg J.A. *Hydrodynamic Propulsion and Its Optimization: Analytic Theory*. NY etc.: Springer, 1994, 368 p.
- [20] Кличко В.В. *Гидроаэродинамика несущего комплекса АСВП и методы до-стижения заданных характеристик поддержания, остойчивости, ходкости и мореходности этих судов*. Дисс. ... д-ра техн. наук. Ленинград, 2010.

Статья поступила в редакцию 21.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

С.Д. Попов, С.Н. Чувашев. Проектирование и комплексное математическое моделирование судна на воздушной подушке для регионов Севера, Сибири и арктического континентального шельфа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/640.html>

**Попов Сергей Дмитриевич** родился в 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Канд. техн. наук, доц. кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, главный конструктор НПЦ «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Чувашев Сергей Николаевич** родился в 1956 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1979 г. Д-р физ.-мат. наук, проф., руководитель расчетной группы НПЦ «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [snchuv@mail.ru](mailto:snchuv@mail.ru)