

УДК 629.12:519.6

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТА АМФИБИЙНОГО СУДНА  
НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ С ГИБКИМ ОГРАЖДЕНИЕМ  
БАЛЛОНЕТНОГО ТИПА**© 2013 г. Л.А. Игумнов<sup>1</sup>, А.М. Крыжанов<sup>2</sup>, А.В. Ермолаев<sup>3</sup>, П.С. Кальясов<sup>3</sup><sup>1</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского,<sup>2</sup> Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,<sup>3</sup> Судостроительная компания «Аэроход», Нижний Новгород

isadymacar@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.11.2012

Системно применены методы виртуального проектирования в разработке инновационного проекта амфибийного судна на воздушной подушке с гибким ограждением баллонетного типа для Крайнего Севера и Каспийского моря. Изложены основные результаты применения технологий вычислительного эксперимента по принципиальным положениям проекта в части аэрогидродинамики и конструктивно-силовых схем корпуса и движительно-рулевого комплекса.

*Ключевые слова:* амфибийное судно на воздушной подушке, гибкое ограждение, движительно-рулевой комплекс, вычислительный эксперимент, аэрогидродинамика, конструктивно-силовая схема.

**Введение**

Современные методы виртуального проектирования с использованием специализированных программных комплексов позволяют производить выбор оптимальных параметров проектируемого изделия еще на ранней стадии его создания. Методы виртуального проектирования сокращают количество экспериментальных НИОКР, позволяют расширить поисковое поле проектных исследований, и, в конечном счете, обеспечивают надлежащее качество проектной разработки при сокращении финансовых и временных затрат на ее реализацию.

Эффективное применение методов виртуального проектирования предполагает, во-первых, предварительную разработку методик вычислительных экспериментов, а во-вторых, верификацию результатов вычислительных экспериментов с результатами физических экспериментов и натурных испытаний созданных образцов.

При формировании концептуального проекта амфибийного судна на воздушной подушке (АСВП) с гибким ограждением (ГО) баллонетного типа для Крайнего Севера и Каспийского моря использованы разработанные в [1–4] методики вычислительных экспериментов в части аэрогидродинамики и конструктивно-силовой схемы АСВП с ГО баллонетного типа. Эти ме-

тодики прошли верификацию по результатам натурных испытаний серийных образцов АСВП ряда проектов и их модификаций.

Концептуальный проект АСВП с ГО баллонетного типа предполагает доказательный выбор основных, принципиальных моментов компоновки АСВП. Именно эти принципиальные моменты были исследованы методами виртуального проектирования.

**Результаты применения методов  
виртуального проектирования  
в формировании аэрогидродинамической  
компоновки концептуального проекта**

Основными, принципиальными моментами в аэрогидродинамической компоновке (АГДК) АСВП являются:

- двухъярусная трехбаллонетная схема ГО, включающая в себя бортовые и центральный двухъярусные баллонеты с оптимизируемыми из условий ходкости и нагрузок на баллонеты диаметрами;
- четырехсекционная схема воздушной подушки (ВП) с обеспечением функционирования ВП каждой секции своим нагнетателем (нагнетателями) регулируемого расхода воздуха;
- трапециевидный в плане корпус платформы с сужением к корме и оптимизируемыми главными размерениями воздушной подушки;

– оптимизируемые движительно-рулевые комплексы (ДРК), каждый из которых включает в себя маршевый винт, кольцевую насадку, систему рулей направления, спрямляющий аппарат. ДРК располагаются в зоне, где гарантируется минимизация потерь от их паразитной интерференции с кабиной платформы или другими элементами АГДК платформы.

**Двухъярусная трехбаллонетная схема ГО**

Трехбаллонетная схема обеспечивает следующие преимущества:

а) повышенные по сравнению с другими схемами характеристики управляемости, которые обеспечиваются за счет продольного секционирования зоны ВП центральным баллонетом и возможности создания перепада давлений в секциях ВП. Это позволяет создать при ходе на ВП дополнительную боковую силу за счет возникающего вследствие этого перепада угла крена, а также дополнительный разворачивающий момент (момент рыскания) за счет большего сопротивления на накренном баллонете;

б) более высокую в сравнении с двухбаллонетной схемой стабильность давления в ВП при ходе на волне (в особенности на косых курсах) и пересеченной местности.

Двухъярусное ГО имеет два важнейших преимущества перед одноярусным ограждением:

а) при равных клиренсах (расстояниях от нижней кромки ГО до платформы АСВП) сопротивление при движении на режиме ВП по водной поверхности оказывается меньшим у двухъярусного ограждения. Это связано с потребным и большим для одноярусного ограждения радиусом баллонета, кормовая часть баллонета глиссирует по поверхности воды и одновременно находится в зоне действия воздушной подушки. Результаты вычислительных аэрогидродинамических экспериментов для вариантов ГО, показанных на рис. 1, представлены в табл. 1;

б) обеспечение непотопляемости путем секционирования баллонета при использовании одноярусного ГО ведет к резкому увеличению нагрузок на ограждение при движении на пересеченной местности и ходе на волне. При использовании двухъярусного ограждения обеспечение непотопляемости достигается за счет секционирования баллонетов верхнего яруса, что снижает нагрузки на материал нижнего яруса и перегрузки при ходе на волне и пересеченной местности.

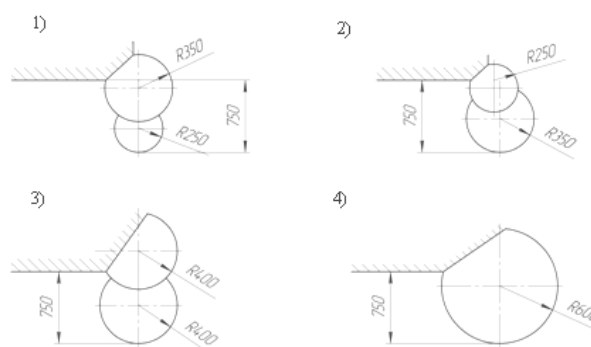


Рис. 1. Схемы двухъярусного (1–3) и одноярусного (4) ограждений

**Четырехсекционная схема воздушной подушки**

Поперечное секционирование ВП с обеспечением функционирования каждой секции своим нагнетателем обусловлено резко выраженной зависимостью аэрогидродинамических качеств АСВП с ГО баллонетного типа от ходовых углов дифферента. Уменьшение ходовых углов дифферента до некоторой величины, конкретное значение зависит от высоты и длины волны, скорости ветра, курсового угла относительно ветра и волны, ведет к повышению скорости движения АСВП при неизменном режиме работы силовой установки или, что то же самое, к росту аэрогидродинамического качества АСВП. Однако дальнейшее уменьшение угла дифферента ведет к выходу на неустойчивый

Таблица 1. Результаты моделирования составляющих сил сопротивления на нижнем ярусе баллонета для различных радиусов нижнего яруса на режиме движения на воздушной подушке со скоростью  $V = 60$  км/час, углом дифферента  $\psi = 1^\circ$ , объемным расходом нагнетателей  $Q = 18$  м<sup>3</sup>/с, давлением в ВП  $p_{ВП} = 1500$  Па

№ варианта	Сопротивление давления на нижнем ярусе баллонета, Н	Сопротивление трения на нижнем ярусе баллонета, Н	Полное сопротивление на нижнем ярусе баллонета, Н
1	302	431	734
2	317	563	880
3	338	612	950
4	423	891	1314

режим, сопровождающийся разгоном АСВП с дальнейшим динамическим контактом баллонов с водой, так называемым «залипанием» и торможением судна. В случае несвоевременного вмешательства в управление «залипание» в связи с большими продольными и вертикальными перегрузками может привести к аварийной ситуации, да и в целом оно довольно плохо переносится пассажирами АСВП.

Вычислительные эксперименты на моделях АСВП различных проектов для различных, в том числе и малых, углов дифферента  $\psi \leq 0,5^\circ$  позволили детально изучить процесс «залипания», аэрогидродинамический механизм которого следует из анализа картин течения, представленных на рис. 2.

Управление углом дифферента АСВП с ГО баллонетного типа позволяет подобрать оптимальный режим движения АСВП и поднять его ходовые характеристики с учетом текущих ветроволновых возмущений, курсового угла, загрузки и центровки судна.

Наиболее эффективный путь управления дифферентом АСВП заключается в использовании активных сил для перебалансировки АСВП. Воздушная подушка секционируется как продольно (центральный баллонетом), так и поперечно (промежуточным ГО). Каждая секция обслуживается отдельным нагнетателем. Применяется система регулируемой подачи воздуха в секции ГО. Если двигатель силовой установки обеспечивает одновременное функционирование маршевого винта и двух бортовых нагнета-

телей (кормового и носового), то в качестве такой системы может использоваться, например, гидравлическая система привода нагнетателей с регулированием распределения мощности между нагнетателями. Достоинством четырехсекционной схемы воздушной подушки с обеспечением функционирования ВП каждой секции своим нагнетателем (нагнетателями) с регулируемым расходом воздуха является возможность перебалансировки АСВП по дифференту в относительно широких диапазонах углов, в том числе при действии ветроволновых возмущений.

#### Трапецевидный в плане корпус платформы с сужением к корме и оптимизированными главными размерениями воздушной подушки

С целью снижения гидродинамического сопротивления при ходе на крейсерском режиме ВП предлагается выполнить корпус платформы трапецевидным с малым сужением к корме. Это означает, что бортовые баллонеты будут заклинены, т.е. развернуты относительно диаметральной плоскости (ДП): в носовой части дальше от ДП, в кормовой – ближе к ДП. Заклинка скег ведет, с точки зрения гидродинамики, к уменьшению смоченной поверхности, обусловленной боковым подпором воды.

Зависимость аэрогидродинамического качества от угла заклинки бортовых баллонов нижнего яруса АСВП при различных числах Фруда, полученная методами вычислительного

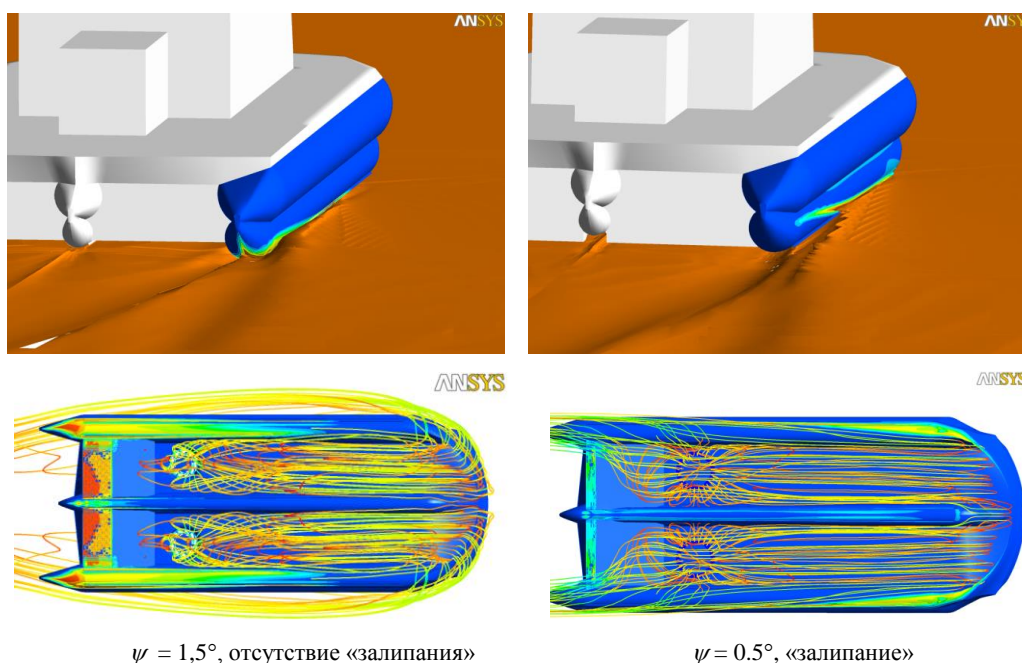


Рис. 2 - К «залипанию» АСВП с ГО баллонетного типа

аэрогидродинамического эксперимента, показана на рис. 3. Положительный угол заклинки соответствует уводу кормовой части баллонета к корме.

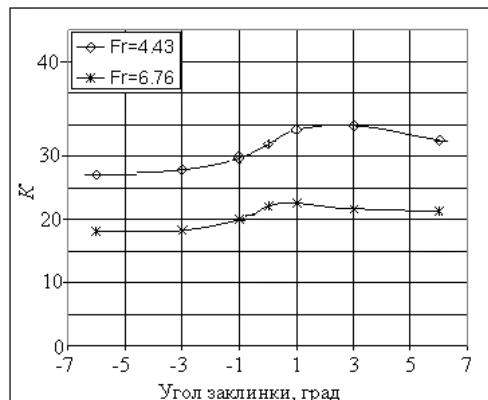


Рис. 3. - Зависимость аэрогидродинамического качества от угла заклинки бортовых баллонетов нижнего яруса для АСВП проекта А-8

### Аэродинамика движительно-рулевых комплексов

#### а) Диаметр винта и целесообразность использования кольцевого насадка

При работе маршевых винтов на кольцевом насадке реализуется дополнительная тяга. Для обеспечения нужных расходов через диск винта происходит забор воздуха сбоку. В районе передней кромки профиля кольцевого насадка образуется зона пониженного давления, обусловленная искривлением линий тока воздуха при подходе к диску винта.

Результаты вычислительных экспериментов показывают, что при равной потребляемой мощности тяга открытого винта выше тяги винта в кольцевом насадке, но ниже тяги всего комплекса «винт + кольцевой насадок» (на рис. 4:  $T_{об}$  – тяга открытого винта,  $T_в$  – тяга винта в комплексе «винт + кольцевой насадок»,  $T_к$  – тяга кольцевого насадка). При больших скоростях (поступь винта  $\lambda > 1$ ) открытый винт и винт в кольцевом насадке работают одинаково, а падение тяги комплекса «винт + кольцевой насадок» обусловлено ростом сопротивления на насадке.

Таким образом, исходя из реализации наибольшей тяги при заданной фиксированной мощности двигателя, для концептуального проекта АСВП с ГО баллонетного типа следует использовать винт в кольцевом насадке, при этом диаметры винта и насадка должны выбираться, с учетом всех конструктивных компоновочных соображений, максимально возможными по величине.

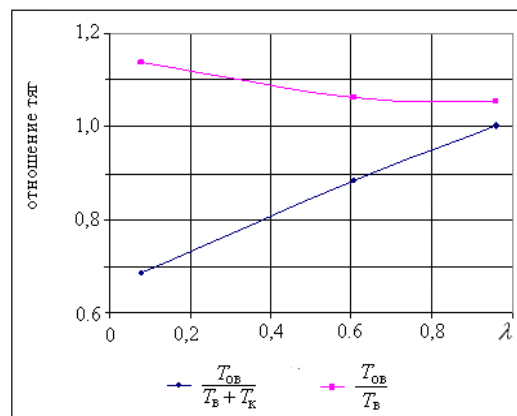


Рис. 4. Соотношение тяг между открытым винтом и комплексом «винт+кольцевая насадка»

#### б) Взаимное влияние двух ДРК

Для надежного решения транспортной задачи на крупных АСВП применяются два двигатель-двигательных комплекса (двигатель – трансмиссия – ДРК), конструктивно независимых между собой.

Одностороннее вращение винтов существенно упрощает проектирование и реализацию трансмиссии АСВП. Однако, как показывают результаты математического моделирования, при одностороннем вращении винтов наблюдается превышение нагрузки на винт одного борта на 50% по сравнению с винтом другого борта. КПД винтов при этом одинаков.

Эффект обусловлен сложной картиной взаимодействия струй как перед, так и за винтами (рис. 5). Часть струи за винтом левого борта «наматывается» на струю винта правого борта сверху и наоборот, часть струи за винтом правого борта «наматывается» на струю левого борта снизу. При этом эффект экрана и разрежения за транцем корпуса АСВП оказывает на струю правого винта тормозящий эффект, а струя левого винта разгоняется свободным потоком и струей правого винта. Струи от винтов отклоняются за судном в сторону вращения винтов.

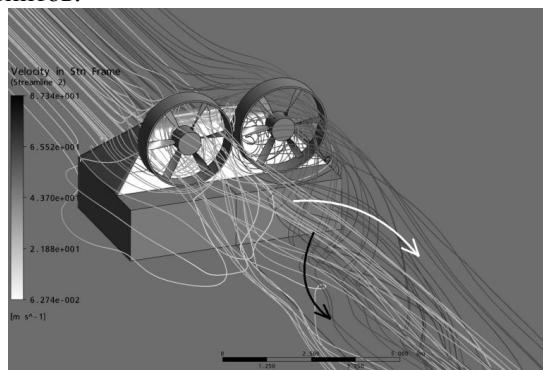


Рис. 5. Картина течения при использовании винтов одностороннего вращения

Результаты проведенного исследования показывают, что для всего диапазона скоростей АСВП наиболее рациональным с аэродинамической точки зрения является параллельное расположение ДРК с разносторонним вращением винтов.

#### в) Аэродинамическая схема ДРК со спрямляющим аппаратом

Известно, что при работе винта потери энергии связаны с ее затратами на закрутку струи. Установка спрямляющего аппарата (СА) позволяет поднять КПД вентилятора. Вместе с тем примеры использования СА на воздушных маршевых винтах встречаются крайне редко, а аэродинамические и конструктивные схемы применения таких устройств отсутствуют. В ходе вычислительных экспериментов было рассмотрено несколько вариантов СА, проведена оценка их эффективности и разработана рациональная аэродинамическая схема СА для винта в кольцевой насадке.

По результатам моделирования был выбран вариант с количеством лопастей СА  $z_{СА} = 7$ . Поле давлений на СА представлено на рис. 6.

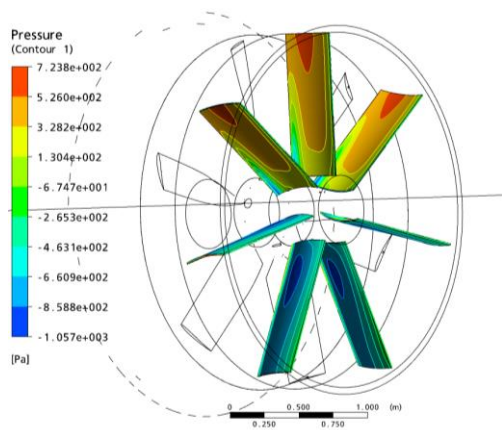


Рис. 6. Поле давлений на лопастях СА

#### Выбор и обоснование конструктивно-силовой схемы корпуса

Применение методов виртуального проектирования позволило в короткие сроки сравнить более десяти вариантов конструктивно-силовых схем (КСС). На рис. 7 представлен оптимизированный методами вычислительного эксперимента корпус АСВП концептуального проекта, применение которого позволяет создать различные исполнения АСВП как с надстройкой в центральной части, так и с открытой грузовой палубой.

Нагрузки на судно для всех расчетных случаев выбирались в соответствии с требованиями Российского Речного Регистра.

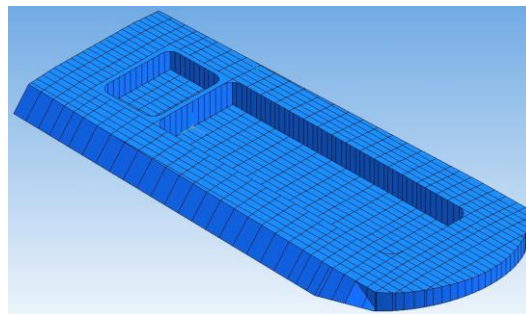


Рис. 7 - Общий вид корпуса

Результаты расчетов общей прочности судна для оптимального по технологическому исполнению и весу варианту приведены на рис. 8–10 в виде распределения напряжений по Мизесу для различных регламентированных правилами Российского Речного Регистра случаев.

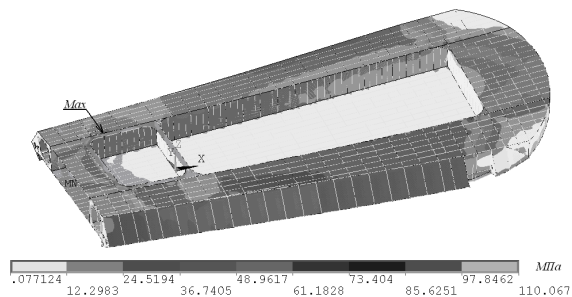


Рис. 8. Распределение напряжений при продольном изгибе совместно с кручением

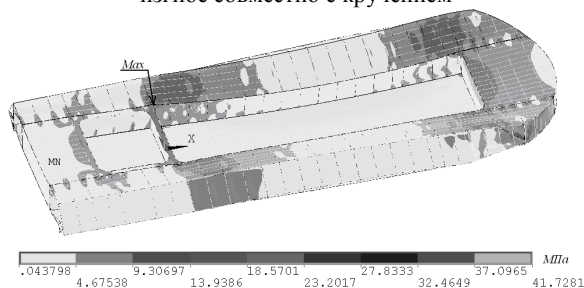


Рис. 9. Поле напряжений при поперечном изгибе

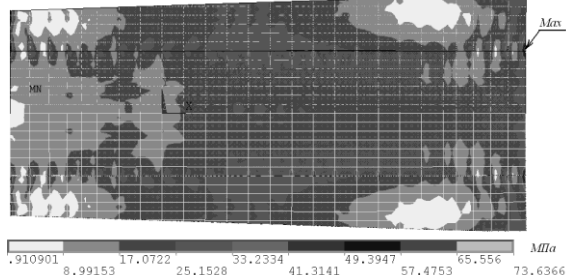


Рис. 10 - Поле напряжений при ударе днищем о воду

Максимальные напряжения при совместном продольном изгибе и кручении (см. рис. 8) возникают в местах соединения кормовой переборки палубы с куполами. Номинальное напряжение составляет 98 МПа.

Максимальные напряжения при поперечном изгибе возникают в местах соединения пере-



борки между моторным отсеком и пассажирским отделением с куполами (см. рисунок 9), при ударе корпуса о воду – в носовой части АСВП (рис. 10).

### Конструктивно-силовая схема движительно-рулевого комплекса

ДРК каждого борта представляет собой толкающий воздушный винт в кольцевой насадке, приводимый во вращение от автономного двигателя через карданную передачу. Ось винта закреплена в центральной обойме, которая жестко связана с кольцевой насадкой коробчатым спрямляющим аппаратом. Рули направления в количестве трех штук на каждом ДРК устанавливаются за воздушным винтом, каждый, на двух опорах-кронштейнах, которые крепятся к насадке.

В процессе проектирования проведено исследование 14 вариантов КСС ДРК. Для каждого варианта проведены как расчеты на прочность, так и частотный анализ. Главный результат применения методов виртуального проектирования в этой части работы – отказ от силовых пилонов ДРК с перенесением силовой несущей функции на спрямляющий аппарат. Это позволило не только поднять эффективную тягу ДРК, но и обеспечить более благоприятные условия работы маршевого винта с точки зрения его ресурса. Системными вычислительными экспериментами выбраны оптимальные по технологическим и весовым требованиям элементы КСС ДРК. Общий вид ДРК концептуального проекта представлен на рис. 11.

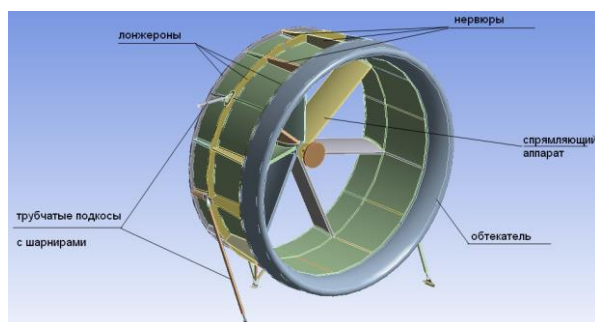


Рис. 11 - Общий вид ДРК концептуального проекта

Спрямляющий аппарат (СА) представляет собой систему профилированных пилонов, расположенных по кругу и имеющих ненулевой угол установки к оси вращения. В центре находится центральный узел маршевого винта.

Центральный узел является связующим зве-

ном, передающим тягу от маршевого винта на СА; он представляет собой цилиндр, на котором закреплены поддерживающие его пилоны СА. Внутри цилиндра располагаются ось винта и система подшипников.

Геометрия закрепления пилонов СА на цилиндре (рис. 12) подбиралась исходя из расчетных случаев, а также для возможного облегчения монтажа.

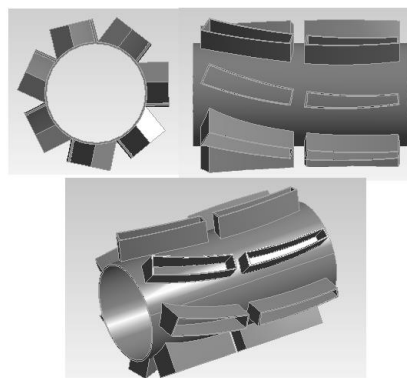


Рис. 12 – Общий вид цилиндра центрального узла

### Заключение

Применение методов виртуального проектирования позволило выбрать и обосновать принципиальные положения концептуального проекта АСВП с ГО баллонетного типа, найти оптимальные параметры аэродинамической компоновки и конструктивно-силовых схем корпуса и ДРК. Использование методов виртуального проектирования позволило значительно сократить сроки проектирования по сравнению с предыдущими образцами АСВП, для которых применялись классические методы физических экспериментов (испытание моделей в аэродинамической трубе, опытовом бассейне, создание различных испытательных стендов). Сравнение ряда вариантов технических решений на ранней стадии проектирования с помощью методов вычислительного эксперимента позволило обоснованно сформировать оптимальный облик АСВП, удовлетворяющий требованиям технического задания на концептуальный проект.

### Список литературы

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2002. 320 с.
2. Развитие и применение методов вычислительного эксперимента для исследования несущего комплекса амфибийных судов на воздушной подуш-

ке / П.С. Кальясов, А.К. Любимов, В.В. Шабаров, А.К. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2009. № 5. С. 142–151.

3. Применение методов вычислительного эксперимента для определения аэродинамических характеристик экраноплана на крейсерском режиме движения / П.С. Кальясов, А.К. Якимов, А.В. Туманин, В.В. Шабаров, В.Н. Блохин, В.М. Прохоров //

Сборник докладов IX международной научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012». Часть I. Сентябрь 7–8. 2012. С. 216–222.

4. Математическое моделирование аэрогидродинамики несущего комплекса амфибийных судов на воздушной подушке (СВП) баллонетного типа / П.С. Кальясов, А.В. Туманин, А.К. Якимов, В.В. Шабаров // Морской вестник. 2011 №4(40). С.103-108.

#### **USING VIRTUAL DESIGN METHODS IN DEVELOPING A CONCEPT DESIGN OF AN AMPHIBIAN HOVERCRAFT WITH A FLEXIBLE BALLONET BOARDING**

*L.A. Igumnov, A.M. Kryzhanov, A.V. Yermolayev, P.S. Kalyasov*

Virtual design methods are used as a system in designing an innovative project of an amphibian hovercraft with a flexible ballonnet-type boarding for the Far North and Caspian Sea regions. The paper presents the main results of applying numerical experiment technologies to the basic aspects of the project concerning the aero-hydrodynamics and structural-force schemes of the hull as well as the propelling-steering complex.

*Keywords:* amphibian hovercraft, flexible boarding, propelling-steering complex, numerical experiment, aero-hydrodynamics, structural-force scheme.