электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 02, февраль 2016

УДК 629.052

Эволюция студенческих креативных проектов подводных аппаратов. Часть 1

***Стрельницкий А.С.**, студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Подводные роботы и аппараты»

***Алещенко А.С.**, студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Подводные роботы и аппараты»

***Семенюк И.С.,** студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Подводные роботы и аппараты»

Научный руководитель: Северов С.П., д.т.н, профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Подводные роботы и аппараты»
ivan-remizov@bmstu.ru

Введение

В сравнительном сопоставлении исследован ряд опытных образцов студенческих подводных роботов типа ROV собственного изготовления как оригинальных продуктов креативных проектов УНМЦ «Гидронавтика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Роботы BMSTU ROV демонстрировались и принимали участие в международных конкурсах и чемпионатах в озерных (оз. Байкал, оз. Гурон) условиях, а также, соответственно в естественных или искусственных акваториях в Атлантическом, Европейском и Тихоокеанском регионах, существенно различавшимися гидрологическими параметрами. Исследование базировалось на свойственному команде «Гидронавтика» опыту участия в полнофункциональных многолетних программах. В результате выявлены основные тренды креативных проектов молодежного научно – технического творчества в области робототехники и подводной индустрии.

Рассмотрены в качестве объекта исследования креативные проекты подводных роботов, факторы инженерной эволюции, основные тренды подводных роботов.

Справочно, креативными по умолчанию будем полагать инициативные проекты творчески активного вида с достаточно высоким уровнем оригинальности, выполняемые энтузиастами, любителями подводной техники, объединениями НТТМ, НКО и др., неформальными творческими объединениями.

По существу, креативным может быть классифицирован любой перспективный проект ПРТ, выполняемый активными, в терминах стандартов России ГОСТ и международного ANSI PMI PMBOK, участниками проекта, в том числе не профессионалами [1,3].

Проекты такого вида прорабатываются в различных целях:

- для опытно-экспериментального подтверждения концепции проекта;
- в рекреационно-досуговых целях подводного плавания;
- технического дайвинга;
- подводного спорта;
- в научных целях биологии, физики и химии гидросферы;
- и др. применений.

Может быть представлено счетное множество непрофессиональных, но результативно эффективных общих и частных технических проектных решений.

По косвенным признакам национальной и транснациональной принадлежности разработчиков ROV, по опубликованным каталогам компаний, в области подводного роботостроения, число креативных разработчиков в национальном масштабе в 10-100 крат превышает количество профессиональных разработчиков аппаратов. К этому могут быть добавлены инициированные, спланированные, достаточно продвинутые, но не завершенные проекты.

Объект рассмотрения

В целях обозримости исходной информации о проектах и наблюдаемых процессах, ограничимся локальной системой робота ROV в виде подводной подвижной платформы-носителя, надводной станции управления и связывающей их нейтрально-плавучей кабельной подсистемы.

Поэтому рассматриваются только подводные роботы, только класса ROV за последние 10 лет. Рассмотрение ведется основываясь на публикациях MATEC Центра морских перспективных технологий образования в области подводной робототехники об участниках соревнований *www.marinetch.org* в том числе команде BMSTU.

Тренды инженерной эволюции ROV просматриваются в соревнованиях MATEC в виде постоянного увеличения числа региональных соревнований за рассматриваемый период с единичных участников до 32 команд 16 стран-участниц финала в 2014 г при 534 участниках региональных и национальных конкурсов.

Заметен тренд нарастания организационной зрелости. После решения проблем первоначального I уровня соревнований, в соответствии с представлениями методологий ITIL /ITSM и градациями CMM - стандартной модели организационной зрелости, Центр MATE постепенно вышел на II уровень, уровень повторяющихся процессов; далее на III уровень – документируемых процессов. Следующим стал IV уровень – управляемых процессов. Высший V уровень соответствует самоустанавливающемуся и саморегулирующемся состоянию мировых соревнований студенческих ROV и требуют только регулярной поддержки. Разработка уникального проекта ведет программе проектов и к портфелю проектов.

Существенные выводы

Заслуживают быть признанными существенно значимыми:

- актуализация тематики конкурсов и подводных технических миссий; актуализация идет по пути выбора акваторий соответствующих тематике ЧС;
- сокращение периода разработки подводного робота и демонстрации погружения;
- выход разработчиков на оптимум частных конструкторских решений;
- политика преобладания совокупности изготавливаемых комплектующих ROV над приобретенными готовыми;
- диверсификация команд по возрасту – вместо одного класса ранее, в настоящее время четыре: EXPLORER-исследователи; RANGER-разведчики; NAVIGATOR-навигаторы; SCOUT-скауты;
- триггерно-пилообразная диаграмма суммарного рейтинга проектной команды, в зависимости от тематики конкурса, предопределяющего состав инструментария подводного робота, и зрелости студенческой команды операторов;
- постоянно меняющийся студенческий состав команды проекта – выпускники уходят, волонтеры приходят, чтобы приобрести навыки;
- свобода адаптации робота к заданию миссии в пределах базовой оценки 500/300 баллов (презентация, защита, документальное сопровождение проекта 200 баллов; подводные операции – 300 баллов).

Инженерная эволюция ROV в действии

Реальная эволюция сложной технической системы имеет вид счетного множества концептуальных (КТР) и частных (ЧТР) технических решений в ответ на необходимость разрешения определенных задач. В данном случае новизна задач гарантируется постановкой новых тем и проблем, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Районирование международных конкурсов MATEC 2010-2015 г.г.

Дата	Тематика конкурса подводных роботов	Расположение конкурсной акватории
2010	Ликвидация последствий разрушения донной геофизической обсерватории HUGO вследствие извержения подводного вулкана Лоихи с помощью ROV	О.Гвайи
2011	Аппараты ROV в индустрии нефтегаза на шельфе. Устранение разрушений на морской буровой платформе BP в Мексиканском заливе	Хьюстон
2012	Использование ROV в исследовании катастроф нефтеналивных танкеров на шельфе океана периода Второй мировой войны и ликвидации экологических угроз	Орландо
2013	Роль ROV в процессах развертывания и обслуживания систем наблюдения за океаном и тектоническими процессами	Сиетл
2014	Исследование с помощью ROV Великих озер Северной Америки: кораблекрушения; гидрология; экология	Мичиган
2015	Инженерная эволюция ROV в экстремальных условиях Арктики в науке и подводной индустрии	Сент-Джонс

Рассмотрение вопросов эволюции в проектировании каждой подсистемы аппаратов, разработанных центром, слишком объемно и выходит за рамки данной статьи.

В качестве типичного примера инженерных решений, принимаемых в УНМЦ «Гидронавтика» в данной статье будут рассмотрены решения проблем проектирования двух таких наиболее важных систем комплексов ROV «Айсберг», и «Акватор – 4» являющихся последними разработками центра, как:

- активный движительный комплекс (далее АДК);
- система технического зрения (далее СТЗ);

Проектная методика расчета гребных винтов для работы в составе активного движительного комплекса малого телеуправляемого подводного аппарата «Айсберг».

В процессе поиска наиболее оптимальных с точки зрения стоимости, времени и эффективности решений был сделан вывод о возможности самостоятельной разработки прототипов гребных винтов с использованием современных технологий 3D - моделирования, 3D - прототипирования и решения задач динамики текучих сред методами МКЭ. Ниже изложена проектная методика расчета и построения 3D – модели гребного винта с ВЗЛ.

Также приводится проектная методика определения параметров гребного винта и привода для построения ВМА, работающего в составе АДК, скомпонованного векторно исходя из желаемой скорости движения аппарата, силы лобового сопротивления, действующей на ТНПА на заданной скорости и габаритных требований к ВМА. В качестве типичного примера приведен расчет пропульсивных и энергетических характеристик АДК ТНПА «Айсберг» (рис. 1).

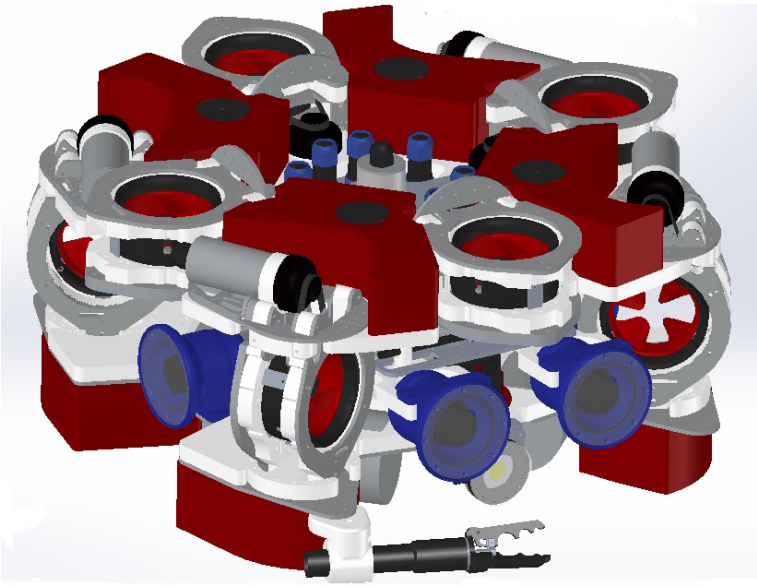

Рис. 1. 3D - модель ТНПА «Айсберг»

В расчетах используются элементы теории идеального движителя [1], зависимости, полученные из вихревой теории Жуковского [1] и МКЭ – пакет Solid Works Flow Simulation (далее SWFS).

Анализ

Выбор энергетических параметров гребных винтов и согласованных с ними двигателей для построения ВМА, как правило, требует наличия в качестве исходных данных либо известных параметров имеющегося двигателя, либо энергетических характеристик гребного винта. Как показывает практика, в условиях проектирования малых низкобюджетных осмотровых аппаратов известными, обычно, являются только желаемое значение скорости в рассматриваемом направлении, гидродинамические характеристики ТНПА, ориентировочные габариты и максимальная электрическая мощность, подаваемая для АДК

Учитывая существенные ограничения с одной стороны на габариты как ВМА так и всего ТНПА в целом, а с другой - на стоимость компонентов, особенно важное значение имеет оптимальность принятых технических решений. Один из возможных методов решения данной задачи был применен при проектировании АДК малого ТНПА «Айсберг». Руководствуясь опытом предыдущих разработок, хорошо себя зарекомендовавших [4], а также учитывая недостатки этих решений были сформулированы следующие требования к АДК:

- обеспечение скорости движения ТНПА в маршевых направлениях, равной не менее $V_г = 1$ м/с;

- векторная компоновка АДК с углом разворота ВМА к маршевой строительной оси, равным $\alpha = 30^{\circ}$;

- обеспечение защиты от запутывания в ВМА длинномеров (тросов, веревок и т.д.);

- максимальная мощность, подводимая к АДК – не более $N_{адк} = 1.5$ кВт;

- возможность установки АДК в конструкционно – силовое основание ТНПА с габаритами 350 х 530 х 530 мм с минимальными потерями результирующего упора за счет сил засасывания [2].

После проведения предварительного проектирования компоновки аппарата, с помощью моделирования в пакете Solid Works Flow Simulation была определена величина лобового сопротивления ТНПА при маршевом движении на скорости $V_г = 1$ м/с, равная $P_{mx} = 44$Н.

Анализируя конструкцию проектируемого ТНПА, и учитывая опыт предыдущих поколений по проектированию ВМА был выбран диаметр гребного винта, равный D = 85 мм.

Таким образом, был получен набор входных данных для расчета параметров движителей АДК:

- максимальная скорость движения ТНПА по маршу, $V_г$ = 1 м/с;
- мощность, подводимая к АДК , $N_{адк}$ = 1.5 кВт;
- максимальный упор на скорости 1 м/с, R = 44Н;
- диаметр гребного вина, D = 85 м;
- угол векторной раскладки α = 30°;
- число маршевых ВМА равно 4;
- общее число ВМА равно 8.

Расчет энергетических параметров гребного винта

Определим проекцию упора, развиваемого одним ВМА на строительную ось аппарата в набегающем со скоростью $V_г$ потоке, обеспечивающую желаемую скорость движения $P_a = \frac{R}{4} = 11H$.Сложность анализа работы движителя в скошенном потоке заключается в том, что результирующий вектор упора (P_c, рисунок 2) движителя отклонятся от оси движителя и при этом увеличивается по модулю.

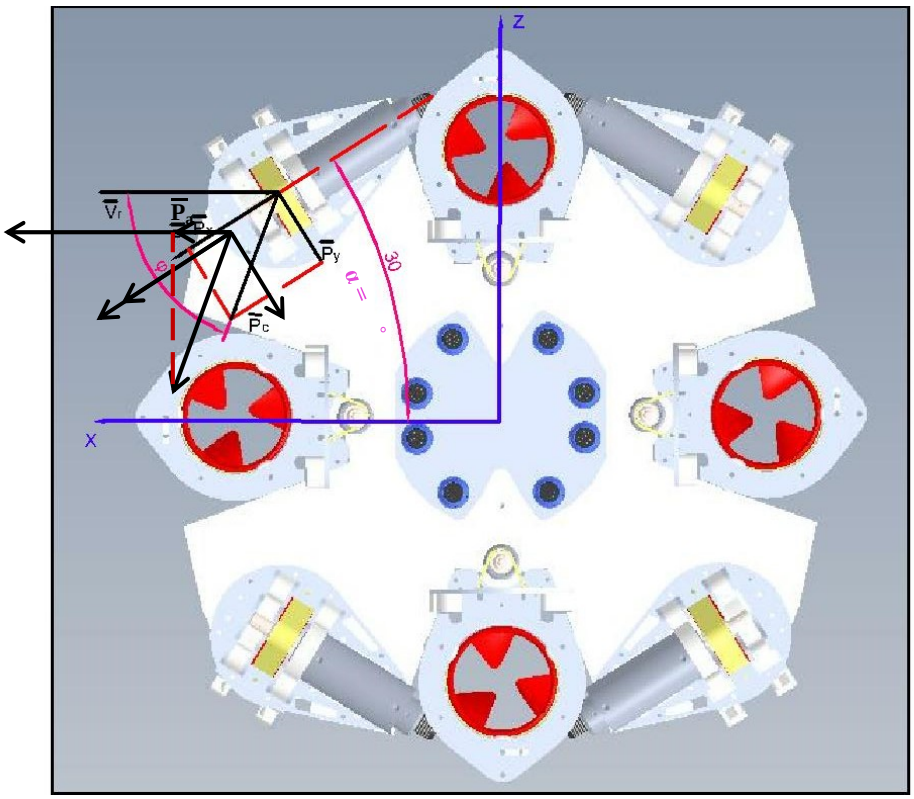

Рис. 2. Вид сверху на АДК ТНПА «Айсберг», установленного в КСО. P_x – проекция упора на ось вращения движителя, P_y – проекция результирующего упора, перпендикулярного оси вращения движителя, P – вектор упора, развиваемый движителем при V_r – вектор скорости набегающего потока

Для дальнейшего анализа целесообразно разложить этот вектор на две составляющие, одна из которых направлена вдоль оси вращения движителя, а другая перпендикулярно ей (рисунок 2). Для проведения дальнейших расчетов необходимо определить желаемый упор, развиваемый движителем в прямом набегающим со скоростью V_r потоке..

Для проекций P_x и P_y справедливы следующие соотношения [1]:

$$\begin{cases} P_x = P \cdot \dfrac{1+\sqrt{1+\sigma_p}-2\cdot\cos(\alpha)}{\sqrt{1+2\cdot\sigma_p}-1} \\ P_y = P \cdot \dfrac{2\cdot\sin(\alpha)}{\sqrt{1+2\cdot\sigma_p}-1}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь σ_p – коэффициент загрузки движителя по упору, определяемый соотношением:

$$\sigma_p = \frac{2 \cdot P}{F_r \cdot \rho \cdot V_r^{\,2}} \qquad (2)$$

Здесь $F_r = \frac{\pi D^2}{4}$ – площадь сечения движителя, ρ = 1025 кг/м^3

Из рисунка 2 видно, что желаемая проекция упора P_a на строительную ось аппарата Ox связана с проекциями P_x и P_y и вектором P_c следующими соотношениями:

$$\begin{cases} P_c = \sqrt{P_x^{\,2} + P_y^{\,2}} \\ \varphi = arctg(\frac{P_y}{P_x}) + \alpha \\ P_a = P_c \cdot \cos(\varphi)\,. \end{cases} \qquad (3)$$

Уравнения (2) – (4) полностью определяют зависимость величина проекции $P_a = f(P)$ от собственного упора ВМА в прямом набегающем потоке P при заданных параметрах скошенного потока и АДК. Построим график зависимости $P_a = f(P)$, используя пакет MathCad 14 (рисунок 3). С помощью рисунка 3 определим искомую величину: P_a = 24 Н.

Теперь определим желаемую скорость вращения и момент, который на этой скорости должен развивать гребной винт исходя из известной величины механической мощности и достижимого для рассматриваемого случая КПД.

Используя формулу (1) вычислим величину коэффициента загрузки по упору:

$$\sigma_p = \frac{2 \cdot P}{F_r \cdot \rho \cdot V_r^{\,2}} = \frac{2 \cdot 24}{6.079 \cdot 10^{-3} \cdot 1025 \cdot 1^2} = 8.26. \qquad (4)$$

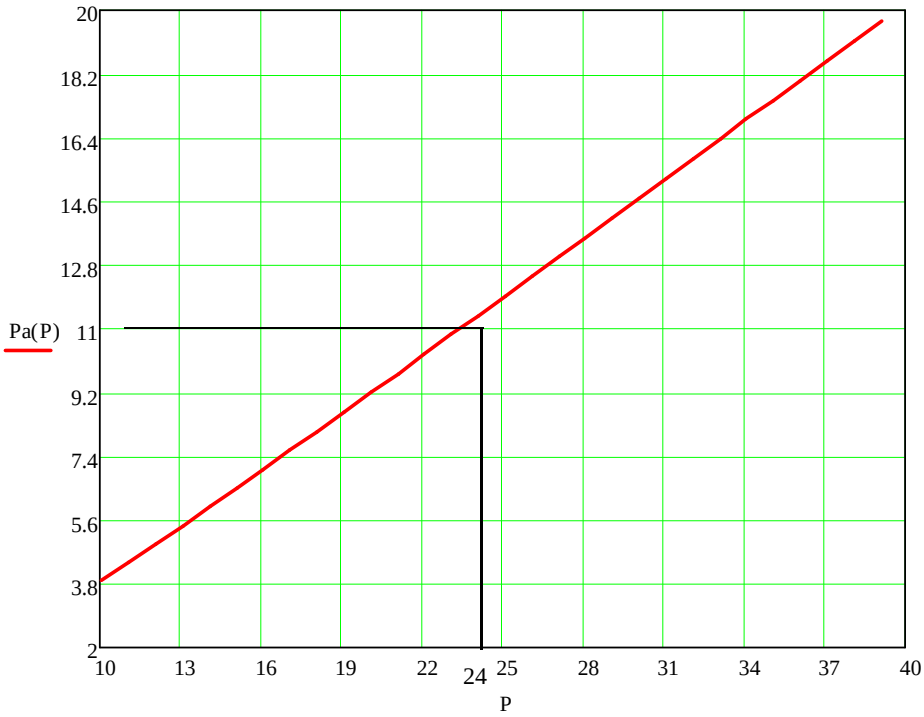

Рис. 3. График зависимости $P_a = f(P)$. Значения по осям указаны в ньютонах

Вычислим КПД идеального движителя, соответствующий данному коэффициенту загрузки по упору [2]:

$$\eta_{pi} = \frac{2}{1+\sqrt{1+\sigma_з}} = \frac{2}{1+\sqrt{1+8.26}} = 0.495. \qquad (5)$$

Примем желаемый КПД гребного винта равным $\eta_в = 0.45$, поскольку для тихоходных подводных подвижных объектов, какими являются ТНПА достигнуть КПД, выше $\eta_в = 0.5$ проблематично [2].

КПД идеального гребного винта можно записать в виде [1]:

$$\eta_в = \frac{V_r}{V_r + \omega_a / 2} \cdot \frac{\omega - \omega_t / 2}{\omega} = \eta_{di} \cdot (1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_t}{\omega}). \qquad (6)$$

Откуда следует

$$\frac{\omega_t}{\omega} = \frac{2 \cdot (\eta_{pi} - \eta_в)}{\eta_{pi}} = \frac{2 \cdot (0.495 - 0.45)}{0.495} = 0.181. \qquad (7)$$

где ω_a и ω_t вызванные продольная и окружная скорости жидкости соответственно.

Также известна связь выражения $\frac{\omega_t}{\omega}$, коэффициента загрузки по упору и угловой скорости вращения ω:

$$\frac{\omega_t}{\omega} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2\sigma_з \cdot V_r^{\,2}}{(R\omega)^2}} \quad , \mathrm{R} = \frac{D}{2} \ . \tag{8}$$

Из выражений (7) и (8) определим необходимую скорость вращения винта:

$$\omega = \frac{V_r \cdot \sqrt{2 \cdot \sigma_p}}{R(1-(1-\frac{\omega_t}{\omega})^2)} = \frac{1.5 \cdot \sqrt{2 \cdot 8.26}}{0.425(1-(1-0.181)^2)} = 166.7\, рад/с \ . \tag{9}$$

Поскольку проектируемый ГВ не является идеальным, рекомендуется увеличить полученную скорость вращения. Практика показывает что оптимальной является поправка в 25 - 30%. Таким образом примем в качестве рабочей скорость вращения, равную ω_p = 200 рад/с.

Определим мощность, подводимую к одному ВМА, исходя из максимальной мощности, подводимой к АДК:

$$N_{\text{вма}} = \frac{N_{\text{адк}}}{8} = \frac{1500}{8} = 187.5 Вт \ . \tag{10}$$

В качестве силовой установки ВМА планируется использовать бесколлекторный двигатель постоянного тока. В результате анализа каталогов продукции наиболее известных производителей было определено, что значения КПД таких машин обычно лежит в диапазоне 0.8 – 0.95. Также исходя из опыта предыдущих разработок УНМЦ «Гидронавтика» было определено, что механические потери передачи мощности с вала двигателя на гребной винт составляют около 10 – 15%. Выбирая из данных диапазонов значения, соответствующие наихудшей энергетике разрабатываемого привода, определим мощность, приведенную на гребной винт:

$$N_{\text{гв}} = (0.8 - 0.15) \cdot N_{вма} \approx 122 Вт \ . \tag{11}$$

Тогда вычислим желаемый момент на гребном винте:

$$M_{\text{гв}} = \frac{N_{гв}}{\omega_p} \approx 0.61\, \text{Н} \cdot м \ . \tag{12}$$

Таким образом, при минимальном количестве входных данных были определены энергетические параметры, необходимые для проектирования модели гребного винта.

Построение параметрической модели ГВ с ВЗЛ и моделирование в SWFS

На основании полученных выше данных построим в пакете SolidWorks 2012 параметрическую модель ГВ с ВЗЛ.

Проведем грубый расчет параметров лопастей ГВ с ВЗЛ, результаты которого будут использованы при построении параметрической модели ГВ и в дальнейшем уточнены моделированием в SWFS.

Рассчитаем значение линейной поступи винта:

$$h_p = \frac{V_r}{n} = V_r \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\omega_p} = 1 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{200} = 0.0314 м . \quad (13)$$

Пренебрегая гидродинамическим скольжением и принимая шаг винта постоянным и равным линейной поступи, вычислим зависимость шагового угла сечения лопасти от радиуса, на котором оно находится:

$$\begin{cases} \varphi = arctg \dfrac{H}{2 \cdot \pi \cdot r} \\ H \approx h_p . \end{cases} \quad (14)$$

Построим лопасть гребного винта по 6 сечениям, представляющим собой эллипсы (рисунок 4) и характеризующиеся следующими параметрами:

- ширина сечения d, связанная с радиусом сечения соотношением:

$$d = k_d \cdot r,$$

где k_d – коэффициент пропорциональности;

- толщина сечения b, связанная с радиусом сечения соотношением:

$$b = k_h \cdot r,$$

где k_h – коэффициент пропорциональности;

- шаговый угол φ, связанный с радиусом сечения соотношением (14)

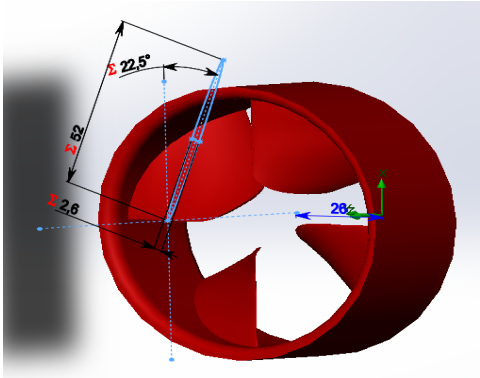

Рис. 4. Сечение проектируемого ГВ с ВЗЛ на радиусе r = 26 мм

Все параметры связаны соответствующими уравнениями с радиусом сечения r и параметрами H, k_d, k_h, варьируя которыми можно изменять геометрию модели.

Проводя серию моделирований и варьируя вышеуказанные параметры так, чтобы получить желаемый упор и момент, построим модель винта, работающую на желаемом режиме по результатам одного моделирования (рисунок 5). Установившиеся значения упора, момента и скорости в сечении винта, а также потребляемой, развиваемой мощности и КПД приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты единичного моделирования проектируемого ГВ с ВЗЛ

Параметр	Значение
Упор в набегающем потоке V_r = 1 м/с, P	25.15 Н
Момент,M	0.51 Нм
Скорость потока в сечении винта,V_s	2.3 м/с
Потребляемая мощность, $N_p = M \cdot \omega$	102 Вт
Развиваемая мощность, $N_{мех} = P \cdot V_p$	25.15 Вт
КПД	0.245

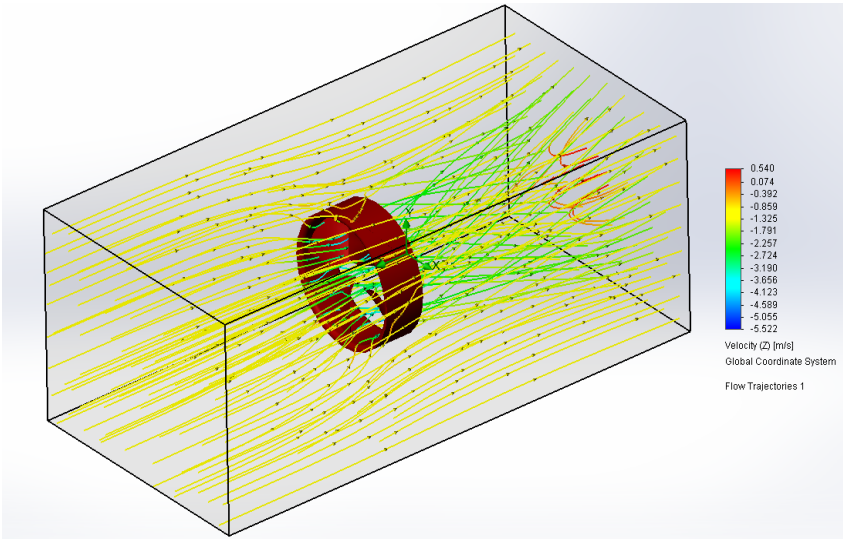

Рис. 5. Картина обтекания спроектированного ГВ с ВЗЛ. Скорость набегающего потока $V_p = 1$ м/с

В результате исследований коллег автора (И. И. Ремизов, «Оценка возможности использования SolidWorks Flow Simulation для проектирования гребных винтов и методики обработки результатов моделирований. Сравнительный анализ пропульсивных характеристик гребных винтов классического типа и гребных винтов с внешним зацеплением лопастей.») показано, что единичные измерения пригодны лишь для грубого анализа, поэтому, чтобы убедиться, что параметры спроектированной модели укладываются в заданные рамки, проведем моделирование дополнительно на скоростях вращения 100 и 300 рад/с и построим в Microsoft Excel аппроксимированные зависимости момента, упора и КПД от скорости вращения ГВ (рис. 6,7).

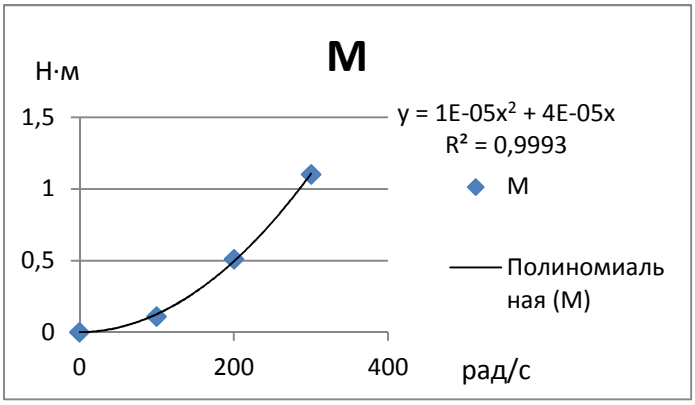

Рис. 6. Аппроксимированная зависимость момента от скорости вращения параметрической модели ГВ

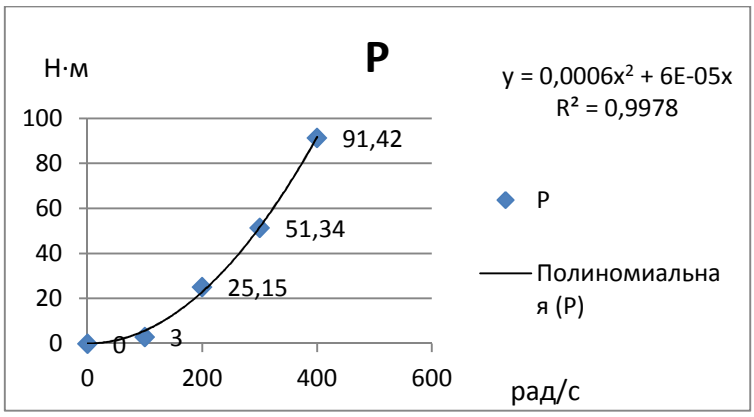

Рис. 7. Аппроксимированная зависимость упора от скорости вращения параметрической модели ГВ

Точка (400, 91.42) введена для приведения аппроксимационной функции к теоретической зависимости вида $P = K_p \cdot \omega^2$. Данные зависимости показывают, что результаты моделирования хорошо описываются теоретическими зависимостями. Пользуясь полученной функцией упора от скорости вращения, уточним значение упора и момента в рабочей точке:

$$P_{ym} = 0.0006 \cdot \omega^2 = 0.0006 \cdot 40000 = 24H$$

$$M_{ym} = 0.00001 \cdot \omega^2 = 0.00001 \cdot 40000 = 0.4H \cdot м$$

$$P_{ym} = M_{ym} \cdot \omega = 80Вт.$$

Проведем поверочное моделирование полученной модели в косом потоке ($\alpha = 30°$). На рисунке 8 показана картина обтекания движителя в косом потоке, а в таблице 3 приведены значения проекций упора на продольную и поперечную оси движителя P_x и P_y, а также проекция результирующего упора на строительную ось OX аппарата P_a, рассчитанная по формулам (4).

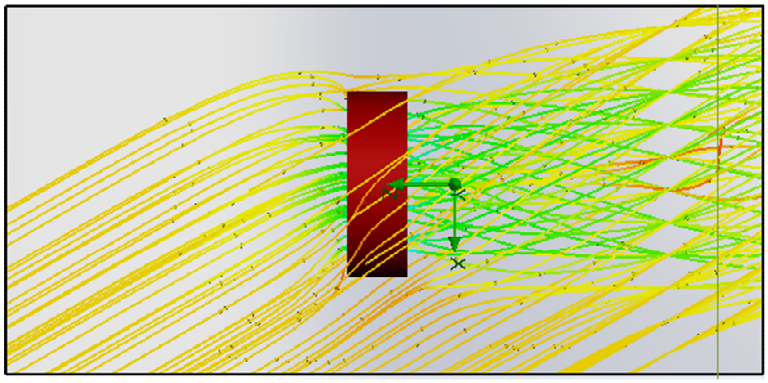

Рис. 8. Картина обтекания ГВ с ВЗЛ в косом потоке, $\alpha = 30°$

Таблица 3

Результаты моделирования ГВ с ВЗЛ в косом потоке

Параметр	Значение
P_y	22,7 Н
P_x	0,15 Н
P_a	19.6 Н

Данные результаты, позволяют сделать вывод о пригодности использования полученной модели ГВ в составе проектируемого ВМА.

Выводы

В данном разделе была представлена методика, использованная при разработке АДК ТНПА «Айсберг». В данный момент ведется работа по уточнению полученных результатов в натурном эксперименте. Важно отметить, что применимость результатов данной работы к разработке АДК для ТНПА больших классов остается под вопросом и является одним из объектов дальнейших исследований.

Список литературы

[1]. Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. 780 с.

[2]. Войтов Д. В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. М: Моркнига, 2012. 506 с.

[3]. Северов С.П. Инновационные технологии профессиональной подготовки инженеров подводной робототехники и морской индустрии в России // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. № 10. 2011. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/233419.html (дата обращения 21.10.2015).