

Методика расчета гидродинамических коэффициентов АНПА

В.А. Костюков, А.Е. Кульченко, Б.В. Гуренко

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: Обосновывается необходимость численного исследования гидродинамических коэффициентов автономного необитаемого подводного аппарата. Приведен алгоритм расчета коэффициентов. Определены начальные условия и модели среды, используемые при расчете. Приведены результаты исследования и методика расчета результатов виртуальной обдувки.

Ключевые слова: АНПА, гидродинамика, математическая модель, полином, аппроксимация, программный комплекс.

Введение

Адекватная математическая модель движения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) необходима для синтеза системы управления подводным аппаратом [1-7]. В работе математическая модель АНПА разрабатывается с использованием общих и частных законов природы. Математическая модель движения АНПА описывает перемещения подвижного объекта в вязкой среде, поэтому для синтеза адекватной модели требуется с достаточной точностью получить гидродинамические зависимости. На рис. 1 приведен внешний вид исследуемого аппарата. Математическая модель движения подводного аппарата приведена в [8, 9].

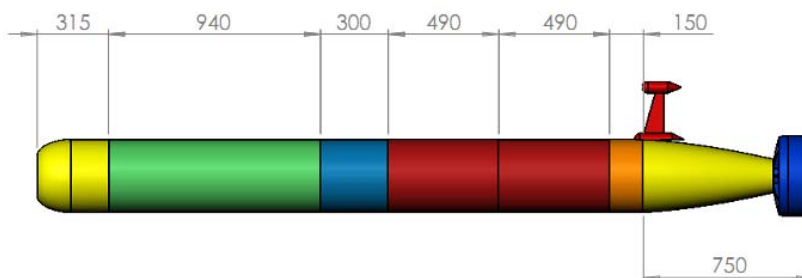


Рис.1. – Схема для определения высоты падения центра тяжести

Определение гидродинамических коэффициентов средствами вычислительной гидродинамики

Расчет гидродинамических коэффициентов производится в программном комплексе Numeca FINE/Hex [10]. Процедура гидродинамического расчета с использованием программного комплекса имеет вид:

- 1) создание расчетной области;
- 2) импортирование созданной геометрической модели в пакет NUMECA International;
- 3) задание граничных условий на поверхностях полученной области;
- 4) генерация сетки;
- 5) выбор основных параметров среды;
- 6) выбор математической модели, описывающей кинематику и динамику сплошной среды;
- 7) задание начального приближения к решению;
- 8) задание вычислительных параметров (т.е. величин, которые определяют используемые алгоритмы вычислительных процессов);
- 9) задание выходных параметров и типов их представлений после вывода;
- 10) запуск модели на расчет в вычислительном модуле и контроль сходимости процесса расчета;
- 11) просмотр полученных результатов расчета с помощью блока CFView.

В работе для описания кинематики и динамики сплошной среды была выбрана система уравнений Навье-Стокса с учетом турбулентности по Спаларт-Альмаресу. Сеточное разбиение расчетной области произведено с использованием подпрограммы HEXPRESS. Были заданы следующие

начальные приближения: угол атаки 20 градусов, угол скольжения 0 градусов, характерные значения скорости движения аппарата 1, 3, 5, 7 м/с.

Обработка результатов гидродинамических расчетов

В результате расчетов были получены двумерные массивы значений компонентов гидродинамических сил и моментов, действующих на АНПА. Для дальнейшего использования расчетных данных в модели динамики предлагается их аппроксимировать полиномами. Такой способ позволяет интегрировать учет гидродинамики в модель в компактной форме без использования таблиц. Точность аппроксимации оценивается двумя величинами: суммой квадратов отклонений аппроксимирующей функции от базисных значений – SSE и корнем из среднего квадрата отклонения – RMSE. На рис. 2 приведен пример двумерной аппроксимации коэффициента лобового сопротивления c_x по углам атаки и скольжения при скорости $V=1\text{ м/с}$.

На рис.3 приведен алгоритм выбора степени аппроксимирующего полинома. Согласно данному алгоритму, чтобы найти степень аппроксимирующего полинома гидродинамического коэффициента на первом шаге производится аппроксимация полиномом 2-й степени. Инкрементируется i – степень полинома. Производится аппроксимация полиномом i -й степени. Сравнивается среднеквадратическое отклонение $RMSE(i)$ с $RMSE(i-1)$ и $SSE(i)$ с $SSE(i-1)$.

Если погрешность для нового полинома $RMSE(i)$ гораздо меньше, чем в случае полинома $(i-1)$ -степени, тогда степень инкрементируется с шагом 1. Операции аппроксимации и сравнения повторяются до тех пор, пока разница между $RMSE(i)$ и $RMSE(i-1)$, а так же $SSE(i)$ и $SSE(i-1)$, станет незначительной.

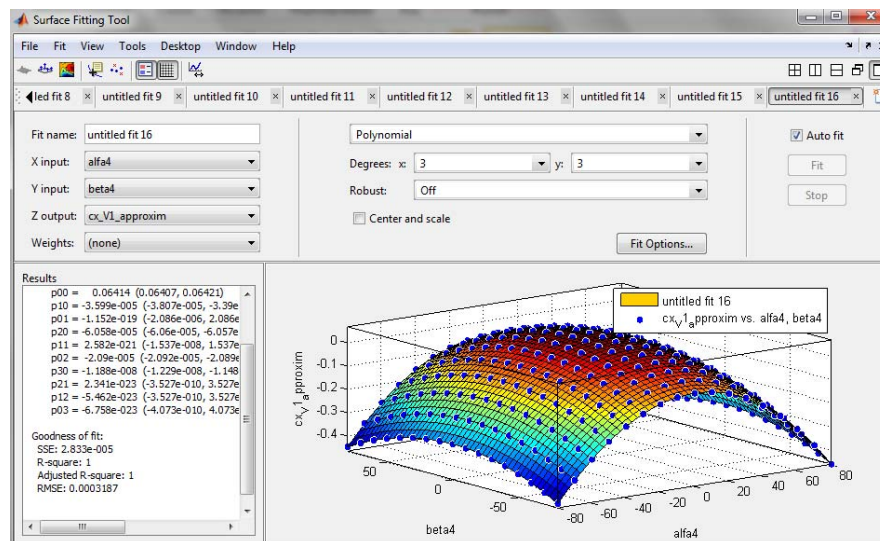


Рис.2. – Двумерная аппроксимация c_x по углам атаки и скольжения при скорости $V=1\text{м/с}$

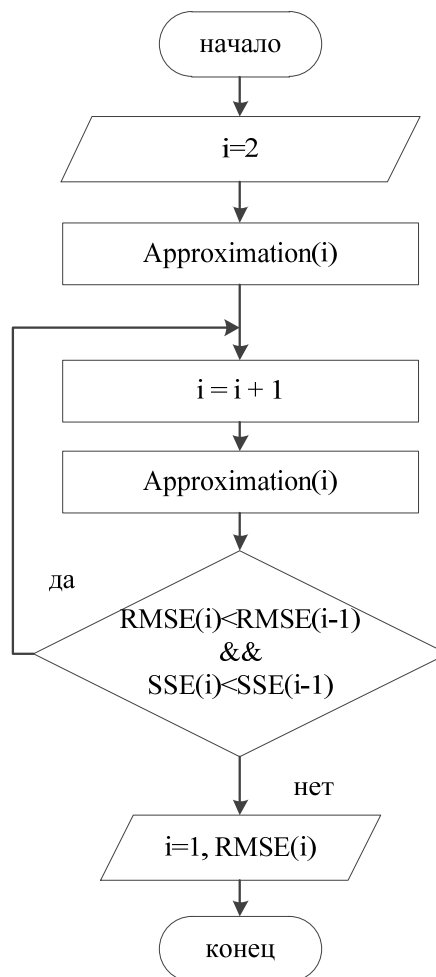


Рис.3. – Блок-схема алгоритма полиномиальной аппроксимации

Рассмотрим пример аппроксимации коэффициента m_x . На первом шаге выбирается начальная степень аппроксимации, затем расчетные данные аппроксимируются полиномами. В данном случае, полиномами 3 и 4 степени. На следующем шаге производится оценивание точности аппроксимации по SSE и RMSE. В таблице 1 приведены погрешности аппроксимации для различных степеней полинома. Из таблицы 1 видно, что SSE(3) и RMSE(3) на порядок выше, чем SSE(4) и RMSE(4). Тогда, в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 3, степень аппроксимации инкрементируется, и производится сравнение SSE(4), RMSE(4) и SSE(5), RMSE(5), из которого видна незначительная разница между величинами погрешностей. Следовательно, для полиномиальной аппроксимации m_x требуется именно полином 4-й степени, поскольку здесь имеется член с коэффициентом 4-й степени $p_{13} = 1.452e-010$ (см. рис. 4) и погрешность для этого полинома гораздо меньше, чем в случае полинома 3-й степени: SSE(3)=0,00244, RMSE(3)=0,0029; SSE(4)=0,00006,7, RMSE(3)=0,00049. Полином же 5-й степени не приводит к уменьшению погрешности аппроксимации. В таблице 1 для коэффициента m_x представлены SSE и RMSE погрешности для разных степеней аппроксимационного полинома.

Таблица № 1

Характеристики аппроксимирующего полинома m_x

Коэффициент	Степень полинома	SSE	RMSE
коэффициент, m_x	3	0,002438	0,002956
	4	$6,776 \cdot 10^{-5}$	0.0004973
	5	$6,506 \cdot 10^{-5}$	0.0004927

Аналогичным образом найдены коэффициенты для m_y, m_z, c_x, c_y, c_z . Характеристики аппроксимации приведены в таблице 2. Итоговое выражение

для гидродинамического коэффициента силы нормального давления имеет вид:

$$c_{xv} = 0,0680 + 3,57 \cdot 10^{-3} \cdot V + 4,46 \cdot 10^{-13} \cdot V^2 \cdot x + 1,12 \cdot 10^{-13} \cdot V^2 \cdot y - 3,543 \cdot 10^{-5} \cdot x - 8,98 \cdot 10^{-19} \cdot y - 6,155 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 2,391 \cdot 10^{-22} \cdot x \cdot y - 2,005 \cdot 10^{-5} \cdot y^2 - 1,204 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 1,62 \cdot 10^{-23} \cdot x^2 \cdot y + 3,044 \cdot 10^{-23} \cdot x^3 \cdot y + 1,222 \cdot 10^{-22} \cdot y^3 + 1,431 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 - 3,988 \cdot 10^{-24} \cdot x^3 \cdot y + 5,283 \cdot 10^{-11} \cdot x^2 \cdot y^2 + 4,299 \cdot 10^{-24} \cdot x \cdot y^3 - 8,756 \cdot 10^{-12} \cdot y^4,$$

где $x = (180/\pi) \cdot \alpha_0$, $y = (180/\pi) \cdot \beta_0$, α_0 , β_0 – углы атаки и скольжения, V – скорость.

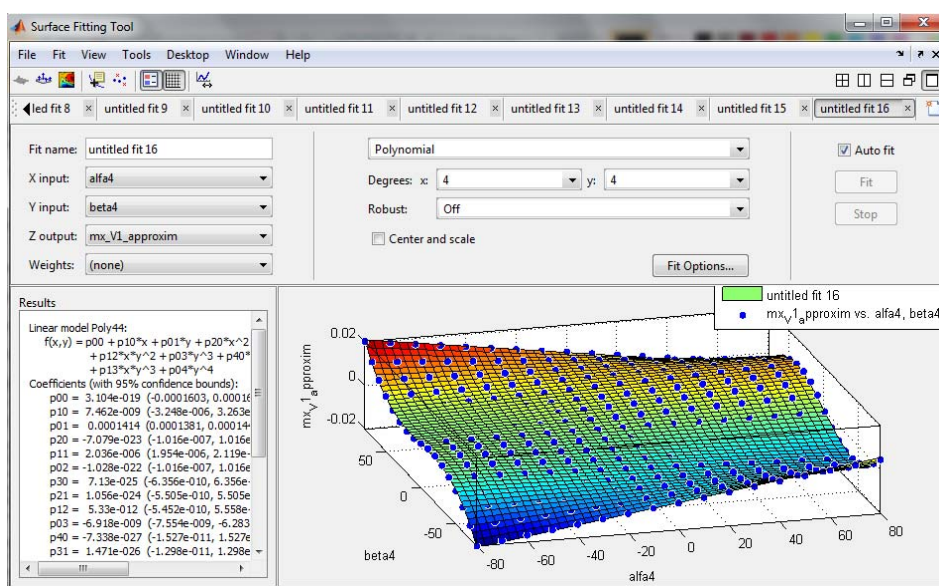


Рис. 4. – Двумерная аппроксимация m_x по углам атаки и скольжения при скорости $V=1\text{м/с}$

Таблица № 2

Характеристики аппроксимирующих полиномов

№ п/п	Коэффициенты	Степень полинома	SSE	RMSE
1	коэффициент нормального давления, c_x	4	$2.03 \cdot 10^{-5}$	0.0002939
2	коэффициент подъемной силы, c_y	3	0.0441	0.01257
3	коэффициент боковой силы, c_z	3	0.1141	0.02022

4	коэффициент момента, m_x	4	$6,7*10^{-5}$	0,00049
5	коэффициент момента рыскания, m_y	3	0.0006829	0.001564
6	коэффициент момента тангажа, m_z	3	0.003299	0.003439

Выводы

На основании полученных полиномов можно получить аппроксимационные выражения для составляющих гидродинамических сил и моментов, действующих на аппарат в движении, которые зависят от скорости движения АНПА, углов атаки и скольжения. Выбор степени аппроксимирующих полиномов основан на показателе RMSE для каждого коэффициента, которые зависят от углов атаки, дрейфа и скорости. Для двумерной аппроксимации c_x , m_x потребовались полиномы 4-й степени, ввиду более сложной формы поверхности. Для остальных коэффициентов построены аппроксимационные полиномы 3-й степени. Степень полинома выбирается так, чтобы полином большей степени обеспечивал значительно большую точность аппроксимации, чем полином более низкой степени. При этом учитывается избыточность, когда увеличение степени полинома не приводит к значительному увеличению точности.

Благодарности

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, НИР по государственному заданию ВУЗам и научным организациям в сфере научной деятельности (№114041540005), грант РФФИ 13-00249.

Литература

1. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Костюков В.А., Гайдук А.Р., Федоренко Р.В., Гуренко Б.В., Крухмалев В.А., Медведева Т.Н.

Проектирование роботов и робототехнических систем: Учебное пособие – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 195 с.

2. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Федоренко Р.В., Гуренко Б.В., Чуфистов В.М., Шевченко В.А. Алгоритмы многосвязного позиционно-траекторного управления подвижными объектами // Инженерный вестник Дона №4, 2014, URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2579

3. V. Pshikhopov, M. Medvedev, A. Gaiduk, "Control Method for Vehicles on Base of Natural Energy Recovery", Applied Mechanics and Materials, Vols. 670-671, pp. 1330-1336, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.1330

4. Пшихопов В.Х., Федотов А.А., Медведев М.Ю., Медведева Т.Н., Гуренко Б.В., Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами // Инженерный вестник Дона №3, 2014, URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2496

5. V. Pshikhopov, Y. Chernukhin, V. Guzik, M. Medvedev, B. Gurenko, A. Piavchenko, R. Saprikin, V. Pereversev, V. Krukhmalev, "Implementation of Intelligent Control System for Autonomous Underwater Vehicle," Applied Mechanics and Materials, Vols 701 - 702, pp. 704-710, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.701-702.704

6. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Y., and Gurenko B. V. Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle // Applied Mechanics and Materials Vols. 490-491 (2014). Pp. 700-707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM. 490-491.700.

7. Гуренко Б.В., Федоренко Р.В., Береснев М.А., Сапрыкин Р.В., Переверзер В.А., Разработка симулятора автономного необитаемого подводного аппарата // Инженерный вестник Дона №3, 2014, URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2504



8. Гуренко Б.В. Построение и исследование математической модели автономного необитаемого подводного аппарата // Инженерный вестник Дона №4, 2014, URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2626.

9. B. Gurenko, "Mathematical Model of Autonomous Underwater Vehicle," Proc. of the Second Intl. Conf. on Advances In Mechanical and Robotics Engineering - AMRE 2014, pp. 84-87, 2014, doi:10.15224/ 978-1-63248-031-6-156.

10. Костюков В.А., Пшихопов В.Х. Применение программного комплекса NUMECA International для расчета аэрогидродинамических параметров математических моделей подвижных объектов// Известия ЮФУ, тематический выпуск «Актуальные проблемы производства и потребления электроэнергии». – Таганрог: Изд-во: ТТИ ЮФУ, 2008. –№7. –С. 82-88.

References

1. Pshikhopov V.KH., Medvedev M.YU., Kostyukov V.A., Gayduk A.R., Fedorenko R.V., Gurenko B.V., Krukhmalev V.A., Medvedeva T.N. *Proyektirovaniye robotov i robototekhnicheskikh sistem: Uchebnoye posobiye* [The development of robots and robotic systems. Tutorial]. Rostov-na-Donu: Izdvo YUFU, 2014. 195 p.

2. Pshikhopov V.KH, Medvedev M.YU., Fedorenko R.V., Gurenko B.V., Chufistov V.M., Shevchenko V.A. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2014, №4, URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2579

3. Pshikhopov V., Medvedev M., Gaiduk A. *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 670-671, pp. 1330-1336, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.1330

4. Pshikhopov V.KH, Fedotov A.A, Medvedev M.YU., Medvedeva T.N., Gurenko B.V. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2014, №3, URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2496



5. Pshikhopov V., Chernukhin Y., Guzik V., Medvedev M., Gurenko B., Piavchenko A., Saprikin R., Pereversev V., Krukhmalev V.. Applied Mechanics and Materials, Vols 701 - 702, pp. 704-710, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.701-702.704

6. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Y., Gurenko B. V. Applied Mechanics and Materials Vols. 490-491 (2014). pp. 700-707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM. 490-491.700.

7. Gurenko B.V., Fedorenko R.V., Beresnev M.A., Saprykin R.V., Pereverzer V.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus). №3, 2014, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2504

8. Gurenko B.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), №4, 2014, URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2626.

9. Gurenko B. Proc. of the Second Intl. Conf. on Advances In Mechanical and Robotics Engineering. AMRE 2014, pp. 84-87, 2014, doi:10.15224/ 978-1-63248-031-6-156.

10. Kostyukov V.A., Pshikhopov V.KH. Izvestiya YUFU, Taganrog, 2008. №7. pp. 82-88.