УДК 626.02.008 DOI: 10.17587/mau.16.738-743

В. Ф. Филаретов[1, 2], д-р техн. наук, зав. лаб., filaret@pma.ru,
А. Ю. Коноплин[1, 2], ассистент, kayur-prim@mail.ru,
А. В. Гетьман[3], к-т техн. наук, доц., alexander_get@mail.ru,
[1]Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,
[2]Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,
[3]Филиал ВУНЦ ВМФ "Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова"
(ТОВМИ им. С. О. Макарова), Владивосток

Экспериментальное определение коэффициентов вязкого трения для расчета силового воздействия на перемещающиеся звенья подводных манипуляторов[1]

Описан подход к экспериментальному определению коэффициентов вязкого трения, возникающего при поступательном перемещении звеньев подводного многозвенного манипулятора в водной среде. Эти коэффициенты необходимы для расчета силовых и моментных воздействий со стороны движущегося манипулятора на подводный аппарат в целях их последующей компенсации. На основе экспериментальных исследований определена зависимость указанных коэффициентов от угла наклона звена к набегающему потоку жидкости.

Ключевые слова: *коэффициент вязкого трения, аэродинамический эксперимент, аэродинамическая труба, многозвенный манипулятор, подводный аппарат*

Введение

В настоящее время большинство обитаемых и телеуправляемых подводных аппаратов (ПА) оснащаются подводными манипуляторами (ПМ), причем от точности и скорости движения ПМ зависит успешность выполнения подводных манипуляционных операций. Однако движущийся в вязкой среде ПМ оказывает на ПА значительные силовые и моментные воздействия, вызванные как инерционными и гравитационными силами, так и силами, определяемыми взаимодействием движущихся звеньев этого ПМ с окружающей вязкой средой [1]. Указанные воздействия приводят к смещению ПА, работающего в режиме зависания вблизи объекта работ, относительно его исходного положения, что снижает точность работы ПМ. Отмеченные эффекты затрудняют качественное выполнение большинства манипуляционных задач.

Известные системы автоматической стабилизации ПА в режиме его зависания вблизи объектов работ [2—5] позволяют компенсировать негативные силовые и моментные воздействия со стороны работающего ПМ, рассчитываемые в реальном масштабе времени. Значения этих динамических воздействий пропорциональны коэффициентам вязкого трения каждого звена ПМ при их произвольном пространственном перемещении в жидкости. Эти коэффициенты могут быть определены экспериментально и зависят от геометрической формы звеньев, особенностей их поверхности, а также от углов наклона к набегающему потоку жидкости. Очевидно, что от точности определения коэффициентов вязкого трения напрямую зависит точность стабилизации ПА в заданной точке пространства.

В работах зарубежных авторов отмечается значительный интерес к решению проблемы точного определения указанных коэффициентов. В работе [3] описаны результаты экспериментального определения коэффициентов вязкого трения, возникающего при перемещении цилиндрических звеньев ПМ в водной среде нормально по отношению к набегающему потоку жидкости. Приводится зависимость этих коэффициентов от отношения пути, пройденного звеном, к диаметру этого звена. В работе [6] получена аналитическая зависимость коэффициента вязкого трения звена ПМ от угла его наклона к набегающему потоку жидкости, но эта зависимость является весьма приближенной.

В работе [7] описан метод экспериментального определения зависимости искомых коэффициентов от угла наклона звеньев ПМ к набегающему водному потоку. Однако полученные значения этих коэффициентов могут быть использованы только для двухзвенного ПМ, к тому же имеющего специальное соединение звеньев. При этом в выражения, используемые для расчета коэффициентов, входят только составляющие линейных скоростей движения сегментов звеньев ПМ, направленные перпендикулярно осям этих цилиндрических звеньев. С помощью этих выражений можно рассчитать коэффициенты вязкого трения только при движении звеньев ПМ перпендикулярно набегающему потоку.

Выполненный анализ существующих подходов и методов показывает, что в настоящее время еще не решена задача создания универсального подхода к экспериментальному определению коэффициентов вязкого трения для каждого из звеньев многозвенного ПМ.

[1] Работа проводилась при финансовой поддержке Научного фонда ДВФУ (соглашение № 13-06-0112-м_а), Минобрнауки РФ (государственное задание 1141), а также РФФИ.

1. Постановка задачи

В статье ставится задача формирования подхода к точному экспериментальному определению коэффициентов вязкого трения при перемещении звеньев ПМ в водной среде. Эти коэффициенты предполагается использовать для расчета воздействий перемещающегося ПМ на ПА в целях точной компенсации этих воздействий в процессе стабилизации ПА в водной среде.

2. Особенности определения силового воздействия на звено ПМ, перемещающееся в водной среде

Поскольку аналитической формы для определения коэффициентов вязкого трения при движении звеньев ПМ в водной среде ввиду их сложной зависимости от параметров движения этих звеньев и многих других физических факторов не существует, то для точного вычисления силовых и моментных воздействий на ПА со стороны работающего ПМ эти коэффициенты необходимо определять экспериментально.

Необходимо отметить, что числа Рейнольдса становятся меньше 10^3 для звеньев ПМ с диаметрами поперечных сечений 0,1 м при их перемещениях в водной среде со скоростями, меньшими 0,01 м/с. Однако в процессе выполнения большинства рабочих операций звенья ПМ имеют значительно большие скорости, при которых появляются заметные динамические воздействия на ПА. Поэтому согласно рекомендациям, изложенным в работе [1], при значениях чисел Рейнольдса, меньших 10^3, влиянием вязкой среды на звенья этих ПМ можно пренебрегать, но в некоторых случаях все же целесообразно и при малых скоростях движения звеньев использовать приведенные в работах [1, 8] значения коэффициентов вязкого трения, не зависящие от углов наклона звеньев ПМ к набегающему потоку жидкости.

При экспериментальном определении указанных коэффициентов в процессе движения звеньев ПМ со скоростями, при которых числа Рейнольдса находятся в диапазоне $10^3 < \mathrm{Re} \leqslant 2 \cdot 10^5$, каждое звено ПМ представлялось в виде однородного цилиндрического тела, на которое набегал встречный водный поток. В этом случае со стороны вязкой среды оказываются силовые воздействия на эти звенья, имеющие квадратичную зависимость от скорости их перемещения [1]:

$$F = \frac{1}{2}\rho k s \upsilon^2, \qquad (1)$$

где k и υ — соответственно коэффициент вязкого трения и линейная скорость поступательного движения звена ПМ; ρ — плотность жидкости; s — площадь проекции боковой поверхности звена на плоскость, нормальную вектору υ.

В работе [8] отмечено, что при строго поперечном обтекании тел цилиндрической формы в указанном диапазоне чисел Рейнольдса коэффициент вязкого трения практически не изменяется, т. е. можно принять $k = \mathrm{const}$.

Поскольку каждый торец каждого звена ПМ соединен либо с соседним звеном, либо с его рабочим органом, либо с ПА, то торцы этих звеньев не будут влиять на значение коэффициента k, которое не зависит от длины звеньев ПМ. Поэтому при экспериментальном определении k звено ПМ должно рассматриваться как бесконечно длинное. Однако при наклоне звена ПМ к набегающему потоку жидкости согласно выражению (1) величина F будет меняться пропорционально длине указанного звена.

Определить коэффициент k для бесконечно длинного однородного цилиндрического звена ПМ можно с помощью аэродинамического эксперимента, соблюдая при этом подобие звена ПМ и его модели по числу Рейнольдса [9]. Для определения коэффициента k наиболее эффективным является метод импульсов (по Джонсу) [10], отличающийся высокой точностью, а также относительной простотой и удобством при проведении экспериментов.

Искомый коэффициент k для не имеющего торцов цилиндрического звена ПМ при использовании указанного метода [10] можно рассчитать по следующей формуле:

$$k = \frac{2}{D}\int_a^b \sqrt{\frac{P_1 - p_1}{P_0 - p_0}}\left(1 - \sqrt{\frac{P_1 - p_0}{P_0 - p_0}}\right) d\hat{Z} = \frac{2}{D}\int_a^b \varphi(\hat{Z})\, d\hat{Z} = \frac{2S}{D}, \qquad (2)$$

где D — характерный размер тела; P_0 — полный напор, p_0 — статическое давление, определяемые пнев-

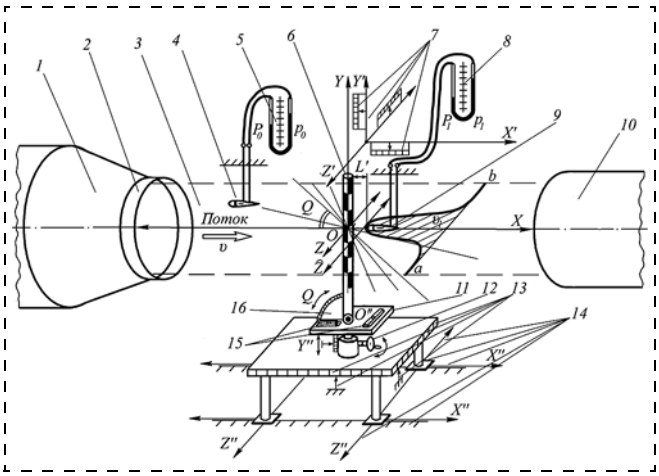

Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 — конфузор; *2* — сопло; *3* — рабочая часть; *4* и *9* — приемники полного и статического давлений; *5* и *8* — U-образные дифференциальные жидкостные микроманометры; *6* — модель звена ПМ; *7* — координатник; *10* — диффузор; *11* — рабочий стол; *12* — подъемник рабочего стола; *13* — подвижная платформа с координатными шкалами; *14* — направляющие платформы; *15* — приборы юстировки рабочего стола; *16* — шкала угловых координат

мометром, расположенным перед моделью звена ПМ в невозмущенном потоке; P_1 и p_1 — полный напор и статическое давление в спутном следе за звеном ПМ соответственно (они определяются специальным пневмометром, который перемещается в этом следе по оси $\hat{Z}$, перпендикулярной вектору скорости υ набегающего потока и лежащей в горизонтальной плоскости при вертикальном расположении звена на фиксированном расстоянии L' от его поверхности); a и b — границы спутного следа по оси $\hat{Z}$; S — площадь, ограниченная экспериментальной кривой $\varphi(\hat{Z})$. Указанные обозначения показаны на рис. 1.

При расположении звена ПМ под углом Q к набегающему потоку $D = d/\sin Q$; $s = ld\sin Q$, где d и l — диаметр и длина звена соответственно.

3. Описание аэродинамической экспериментальной установки

Экспериментальные исследования проводили в аэродинамической трубе АС-1 Филиала ВУНЦ ВМФ "Военно-морская академия". Схема разработанной экспериментальной установки приведена на рис. 1.

В рабочей части АС-1 в центре потока установлена выполненная из алюминиемагниевого сплава модель цилиндрического звена ПМ *6*, геометрически подобная реальному звену диаметром $d = 0{,}05$ м. При любом значении угла Q торцы звена *6* не попадают в поток, чтобы не создавать помех и вихреобразования в рабочей части аэродинамической трубы. Все перемещения звена и измерительных приборов выполняли в прямоугольной системе координат (СК) XYZ, ось X которой совпадает с направлением вектора υ скорости воздушного потока, ось Y вертикальна, а ось Z составляет правую тройку. При этом центр СК XYZ расположен в центре рабочей части аэродинамической трубы, где поле скоростей стабильно и хорошо известно.

В экспериментальных исследованиях применяли пневмометрический метод фиксации полного напора и статического давления в потоке с помощью приемников *4* и *9* этого давления. Указанные величины измеряли лабораторными жидкостными U-образными дифференциальными микроманометрами *5* и *8*. Приемник давлений, фиксирующий значения P_1 и p_1 в следе за моделью, был установлен с помощью координатника *7* с координатными шкалами $X'Y'Z'$ на одинаковом для всех углов Q расстоянии $L' = 0{,}02$ м = const вдоль оси $\hat{Z}$, параллельной оси Z СК XYZ и образующей с ней горизонтальную плоскость.

Для повышения точности полученных измерений ось цилиндрического звена *6* при любом значении угла Q всегда проходила через точку O (рис. 1). Для этого при наклоне указанного звена на угол Q в шарнире O'' оно перемещалось в горизонтальной и вертикальной плоскостях с помощью подвижной платформы с координатными шкалами $X''Y''Z''$ до совпадения оси цилиндра с точкой O. Контроль угла Q осуществлялся с помощью шкалы угловых координат *16*. При этом положение рабочего стола *11* строго в горизонтальной плоскости контролировалось приборами юстировки *15*.

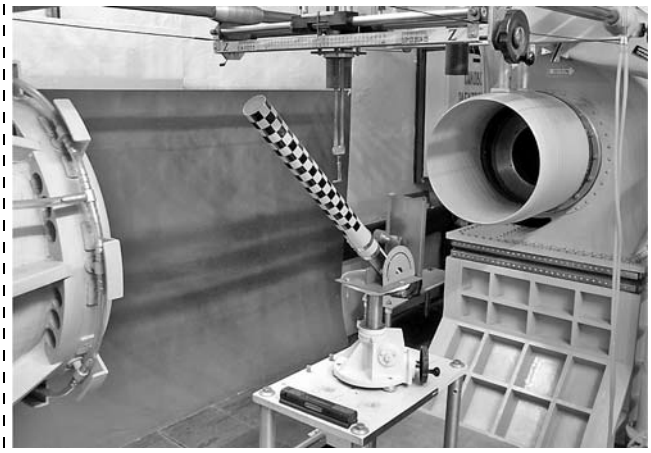

Рис. 2. Общий вид аэродинамической экспериментальной установки

Для каждого исследуемого угла Q после установки звена ПМ в желаемое положение проводили измерение величин P_1 и p_1 приемниками *4* и *9*, перемещаемыми из исходного положения за звеном *6* по оси $\hat{Z}$ с шагом 0,005 м до значений +(−) 0,07 м и с шагом 0,01 м — до значения +(−) 0,17 м.

Общий вид экспериментальной аэродинамической установки показан на рис. 2. На этом рисунке изображено положение модели звена ПМ под углом $Q = 45°$ к набегающему воздушному потоку.

4. Результаты экспериментальных исследований

Для каждого положения звена *6* в воздушном потоке на основе измерений величин P_0, P_1, p_0 и p_1 в реальном масштабе времени по формуле $\upsilon_1 = \sqrt{\dfrac{2g\xi(P_1 - p_1)}{\rho}}$ строили эпюру скорости υ_1 в спутном аэродинамическом следе, где $g = 9{,}81$ — коэффициент перевода единицы давления (мм водяного столба) в единицу Н/м^2; $\xi = 0{,}9...1$ — поправочный коэффициент приемников давления. При этом атмосферную барометрическую плотность среды ρ определяли до начала измерений, и она оставалась неизменной в процессе этих измерений.

Скорость невозмущенного потока υ в аэродинамической трубе составляла 26 м/с. Поэтому при $Q = 90...12°$ число Рейнольдса находилось в диапазоне $9 \cdot 10^4 < \mathrm{Re} \leqslant 4{,}3 \cdot 10^5$. Значения коэффициента k для каждого положения звена *6* рассчитывали по формуле (2), а площадь S, ограниченную экспериментальной кривой $\varphi(\hat{Z})$, вычисляли методом графического интегрирования в разработанной компьютерной программе.

На рис. 3 показано построенное семейство эпюр скорости υ_1 при угле Q, изменяющемся от 90 до 12°. Из этого рисунка видно, что при Q = 90...38° боковая граница следов криволинейна, и из-за интенсивного срыва потока с боковой поверхности модели цилиндрического звена ПМ имеется тенденция к формированию обратного течения. При значениях Q ниже 35° обратные течения исчезают, и с уменьшением значения угла Q наблюдается уменьшение площади эпюр, что свидетельствует об уменьшении "дефекта скорости" в спутном аэродинамическом следе модели звена ПМ.

Полученные экспериментальные кривые подтверждают общую картину турбулентного следа, соответствующую гипотезе турбулентности потока Тейлора [11].

На рис. 4 показана экспериментально полученная зависимость значений коэффициента k от угла Q. Использование этого коэффициента в выражении (1) позволяет рассчитать силу вязкого трения, действующую на любое цилиндрическое звено ПМ, перемещающееся в вязкой среде, в любой момент времени.

При выполнении аэродинамического эксперимента общие приборные погрешности для измерителей приемников динамического и статического давлений *4* и *9* не превышали 5 %, а для дифференциальных жидкостных микроманометров *5* и *8* не превышали 3 %. Эти пределы погрешностей измерений соответствуют требованиям к методам и средствам измерений, изложенным в ГОСТ 16263—70, ГОСТ-8.009—84 и ГОСТ 8.505—84.

Для подтверждения результатов аэродинамического эксперимента были выполнены морские испытания с использованием установки, изображенной на рис. 5.

При перемещении цилиндрического стержня с постоянной скоростью нормально к набегающему потоку жидкости измеряли силу вязкого трения F, действующую на этот стержень. Затем по формуле (1) рассчитывали коэффициенты вязкого трения. Значения этих коэффициентов, полученные в результате натурных испытаний, более чем на 15 % превышают значения этих же коэффициентов, полученные в аэродинамическом эксперименте. Это объясняется тем, что торцы протягиваемого в водной среде звена приводят к дополнительному увеличению определяемых коэффициентов вязкого трения. С учетом отмеченного можно заключить, что определенные в различных экспериментах коэффициенты вязкого трения являются близкими по их значениям.

Заключение

Результаты проведенных экспериментов показали, что с помощью созданной установки можно достаточно просто определять коэффициенты вязкого трения, возникающего при поступательном перемещении любого звена ПМ в водной среде. Знание этих коэффициентов позволяет корректно рассчитать силовые и моментные воздействия движущегося в водной среде многозвенного ПМ на ПА.

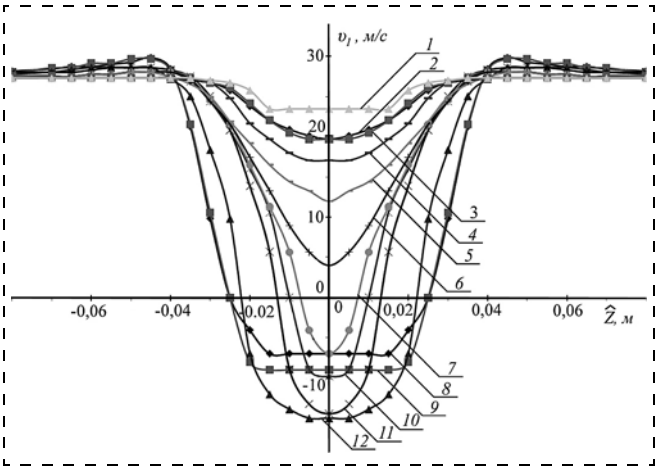

Рис. 3. Экспериментальные кривые профиля скоростей в следе за цилиндрическим звеном ПМ при различных углах Q к набегающему потоку:
1 — Q^0 = 12°; *2* — Q^0 = 17°; *3* — Q^0 = 22°; *4* — Q^0 = 27°; *5* — Q^0 = 30°; *6* — Q^0 = 35°; *7* — Q^0 = 38°; *8* — Q^0 = 90°; *9* — Q^0 = 75°; *10* — Q^0 = 40°; *11* — Q^0 = 45°; *12* — Q^0 = 60°

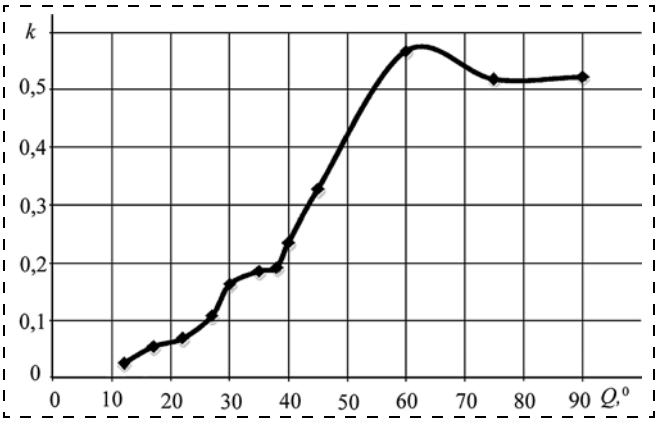

Рис. 4. График зависимости значений коэффициента k от углов Q для цилиндрического звена ПМ

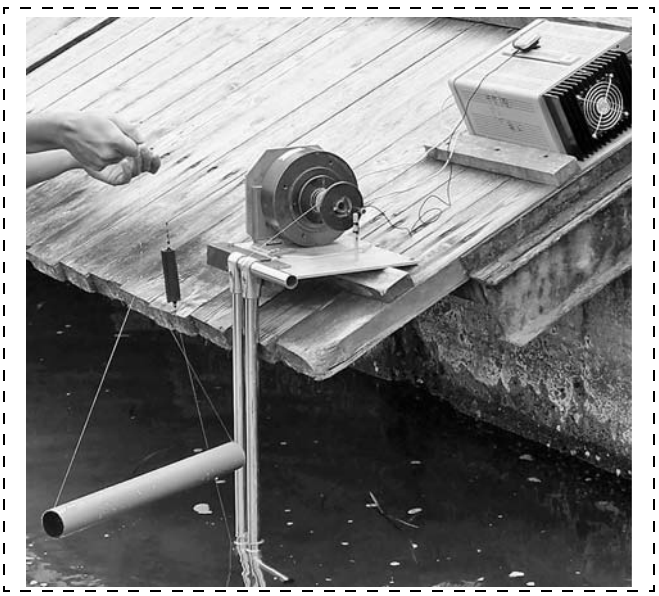

Рис. 5. Морская экспериментальная установка

Список литературы

1. **Coiffet P.** Robot Technology: Interaction with the environment. London: Kogan Page Ltd., 1983. 290 p.
2. **Филаретов В. Ф., Алексеев Ю. К., Лебедев А. В.** Системы управления подводными роботами / Под ред. В. Ф. Филаретова. М.: Круглый год, 2001. 288 с.
3. **McLain T. W., Rock S. M., Lee M. J.** Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system // Autonomous Robots. 1996. Vol. 3, N. 2—3. P. 213—232.
4. **Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю.** Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 53—56.
5. **Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю.** Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 29—34.
6. **Tarn T. J., Shoults G. A., Yang S. P.** A dynamic model of an underwater vehicle with a robotic manipulator using Kane's method // Autonomous Robots. 1996. V. 3, N. 2—3. P. 269—283.
7. **Leabourne K. N., Rock S. M.** Model Development of an Underwater Manipulator for Coordinated Arm-Vehicle Control // OCEANS '98 Conference Proceedings. Oct 1998. V. 2. P. 941—946.
8. **Корпачев В. П.** Теоретические основы водного транспорта леса: Учеб. пособ. для вузов. М.: Академия Естествознания, 2009. 237 с.
9. **Юрьев Б. Н.** Экспериментальная аэродинамика. Часть 1. Теоретические основы экспериментальной аэродинамики. М.—Л.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1939, 302 с.
10. **Мартынов А. К.** Экспериментальная аэродинамика. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1958. 348 с.
11. **Абрамович Г. Н.** Теория турбулентных струй. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 720 с.

Experimental Determination of the Viscous Friction Coefficients for Calculation of the Force Impacts on the Moving Links of the Underwater Manipulators

V. F. Filaretov[1, 2], filaret@pma.ru, **A. Ju. Konoplin**[1, 2], kayur-prim@mail.ru✉,
A. V. Getman[3], Alexander_Get@mail.ru,
[1]Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation,
[2]Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950, Russian Federation,
[3]Navy Academy named after Admiral N. G. Kuznetsov, Vladivostok, 690062, Russian Federation

Corresponding author: **Konoplin Aleksandr Ju.,** Assistant,
Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950, Russian Federation,
Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation,
e-mail: kayur-prim@mail.ru

Received on July 05, 2015
Accepted on July 24, 2015

Today most of the manned and telecontrolled underwater vehicles are equipped with multilink underwater manipulators, and the quality of performance of the underwater operations depends on the accuracy and speed of movements of such manipulators. However, an underwater manipulator, moving in the water environment, is subjected to significant force and torque influences. These influences are caused by the inertial and gravitational forces, and also forces determined by interaction of the working manipulator and viscous environment. The specified influences displace the underwater vehicle, operating in a hang mode, from its initial space position. Thus the accuracy of the manipulator's work is reduced. The above effects complicate the qualitative performance of most of the manipulation tasks. The known systems for automatic stabilization of the underwater vehicles in a hang mode near the operating objects allow us to compensate for the negative force and torque influences from the working manipulator. These influences are calculated in real time. The values of these dynamic influences are proportional to the viscous friction coefficients of each manipulator link at the arbitrary spatial movements of a manipulator in water. These coefficients can be determined experimentally and depend on a geometrical form of the links, specific features of their surface and also on the tilt angle of a link to the fluid flow. It is obvious that the accuracy of the underwater vehicle stabilization in a given space point directly depends on the accuracy of definition of the required coefficients. The implemented analysis of the existing approaches and methods shows that today the task of creation of a universal approach to the experimental definition of the viscous friction coefficients of each multilink underwater manipulator link still has to be solved. This paper describes an approach to solving of the assigned task, allowing us to experimentally determine the viscous friction coefficients with the help of an aerodynamic experiment. Herewith, a similarity of the underwater manipulator link and its model in accordance with Reynolds number is observed. The offered approach is based on the momentum-transfer method and is characterized by high accuracy, simplicity and convenience in realization of experiments. For realization of the experimental researches in an aerodynamic tunnel an experimental adjustment was developed. With the help of this adjustment the dependence of the viscous friction coefficients on the tilt angle of a link to the fluid flow was determined. Values of these coefficients are necessary for calculation of the force and torque influences on an underwater vehicle from a moving manipulator with the purpose of their subsequent compensation by means of the vehicle thrusters. For confirmation of the results of the aerodynamic experiment sea tests were done. Herewith, the values of the required coefficients received in the sea and aerodynamic experiments appeared very close.

Keywords: *viscous friction coefficient, aerodynamical experiment, aerodynamical tunnel, multilink manipulator, underwater vehicle*

Acknowledgements: The work was supported by FEFU Scientific Foundation (agreement no. 13-06-0112-m_a), Ministry of Education of the Russian Federation (public job in 1141), as well as the Russian Federal Property Fund.

For citation:

Filaretov V. F., Konoplin A. Ju., Getman A. V. Experimental Determination of the Viscous Friction Coefficients for Calculation of the Force Impacts on the Moving Links of the Underwater Manipulators, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no 11, pp. 738—743.

DOI: 10.17587/mau/16.738-743

References

1. **Coiffet P.** Robot Technology: Interaction with the environment, London, Kogan Page Ltd., 1983, 290 p.
2. **Filaretov V. F., Alekseev Yu. K., Lebedev A. V.** *Sistemy upravleniya podvodnymi robotami* (Control systems for underwater robots), Moscow, Kruglyi god, 2001, 288 p. (in Russian).
3. **McLain T. W., Rock S. M., Lee M. J.** Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system, *Autonomous Robots*, 1996, vol. 3, no. 2—3, pp. 213—232.
4. **Filaretov V. F., Konoplin A. Yu.** *Sistema avtomaticheskoj stabilizacii podvodnogo apparata v rezhime zavisanija pri rabotajushhem mnogozvennom manipuljatore. Chast' 1* (System of Automatic Stabilization of Underwater Vehicle in Hang Mode with Working Multilink Manipulator. Part 1), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 6, pp. 53—56 (in Russian).
5. **Filaretov V. F., Konoplin A. Yu.** *Sistema avtomaticheskoj stabilizacii podvodnogo apparata v rezhime zavisanija pri rabotajushhem mnogozvennom manipuljatore. Chast' 2* (System of Automatic Stabilization of Underwater Vehicle in Hang Mode with Working Multilink Manipulator. Part 2), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2014, no. 7, pp. 29—34 (in Russian).
6. **Tarn T. J., Shoults G. A., Yang S. P.** A dynamic model of an underwater vehicle with a robotic manipulator using Kane's method, *Autonomous Robots*, 1996, vol. 3, no. 2—3, pp. 269—283.
7. **Leabourne K. N., Rock S. M.** Model Development of an Underwater Manipulator for Coordinated Arm-Vehicle Control, *OCEANS '98 Conference Proceedings*, Oct 1998, vol. 2, pp. 941—946.
8. **Korpachev V. P.** *Teoreticheskie osnovy vodnogo transporta lesa: Uchebnoe posobie dlja vuzov* (Theoretical foundations of water transport of wood: textbook for high schools), Moscow, Akademija Estestvoznanija, 2009, 237 p. (in Russian).
9. **Jur'ev B. N.** *Jeksperimental'naja ajerodinamika. Chast' 1. Teoreticheskie osnovy jeksperimental'noj ajerodinamiki* (Experimental aerodynamics. Part 1: Theoretical foundations of experimental aerodynamics), Moscow — Leningrad, Oborongiz, 1939, 302 p. (in Russian).
10. **Martynov A. K.** *Jeksperimental'naja ajerodinamika* (Experimental aerodynamics), Moscow, Oborongiz, 1958, 348 p. (in Russian).
11. **Abramovich G. N.** *Teorija turbulentnyh struj* (The theory of turbulent jets), Moscow, JeKOLIT, 2011, 720 p. (in Russian).

УДК 004.896 DOI: 10.17587/mau.16.743-751

Е. И. Шестаков, студент, shestakov.ei@gmail.com, **М. Ю. Васюта,** студент,
А. М. Косоруков, студент, **С. А. К. Диане,** аспирант, **Я. В. Вершинин,** студент,
Московский государственный технический университет "МИРЭА"

Учебно-исследовательский комплекс на базе LEGO MINDSTORMS NXT 2.0 для отработки технологий многоагентных робототехнических систем

Описывается учебно-исследовательский комплекс, разработанный на базе LEGO MINDSTORMS NXT 2.0, предназначенный для отработки методов и алгоритмов группового управления, а также проведения экспериментальных исследований, демонстрирующих принципы работы многоагентных робототехнических систем. Обсуждаются принципы построения таких систем, состав их программно-алгоритмического обеспечения, описывается предложенный вариант реализации. Приводятся результаты натурного эксперимента, показывающие работоспособность и эффективность применения многоагентных робототехнических систем.

Ключевые слова: *многоагентная робототехническая система, групповое управление, автономный мобильный робот*

Введение

В современной робототехнике все большее внимание уделяется многоагентным робототехническим системам (МАРС), особенность которых состоит в возможности решения широкого спектра задач с большой эффективностью за счет распараллеливания выполняемых процессов между несколькими агентами. Исследования, проводимые в этой области, направлены как на эффективную координацию автономных роботов (агентов) для выполнения общих задач, так и на достижение высокой производительности всей системы [1]. Существует большое разнообразие подходов к построению МАРС и способов их реализации, особенно преуспевают в этом США, Япония, страны Юго-Восточной Азии и Европы [2]. Актуальность разработки и проектирования таких систем связана, прежде всего, с более эффективным по времени и энергоресурсам выполнением МАРС поставленной задачи по сравнению с выполнением той же задачи одним автономным роботом. Существует широкий спектр прикладных задач, которые можно и нужно решать с применением МАРС, например, возведение строительных конструкций, поиск различных объектов на местности, картографирование и др.

Сложившаяся ситуация, несомненно, обязывает проводить большую работу по подготовке кадров в области робототехники и мехатроники с привлечением учебно-исследовательских комплексов для отработки алгоритмов и методов группового управления. Среди разработанных МАРС большую часть составляют прототипы военного образца, такие как "COUGAR" (Cooperative Unmanned Ground Attack