



УДК 531.75 534.14 681.5.015 681.5.08

## МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИСОЕДИНЕННОГО МОМЕНТА ИНЕРЦИИ КОРПУСА СУДНА

А.С. Альшев<sup>a,b</sup>, В.Г. Мельников<sup>a</sup><sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>b</sup> АО Навис, Санкт-Петербург, 199106, Российская Федерация

Адрес для переписки: a.alyshv@navisincontrol.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 15.05.17, принята к печати 15.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-744-748

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Альшев А.С., Мельников В.Г. Метод идентификации присоединенного момента инерции корпуса судна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 744–748. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-744-748

### Аннотация

Предложен новый экспериментальный метод идентификации присоединенных моментов инерции корпуса судна по углу рыскания. На основе обзора существующих методов разработана схема испытательного стенда. Представлены методика проведения испытаний и расчетное соотношение. Предлагаемый метод основан на энергетическом подходе с испытаниями на специальных реверсивно-симметричных движениях. Для реализации метода корпус модели судна закрепляется в специальном испытательном стенде, где в качестве основного двигателя применен упругий элемент. Корректирующий электропривод с маховиком обеспечивает программному вращательному движению точную симметрию.

### Ключевые слова

присоединенный момент инерции, метод энергии, реверсивно-симметричные движения, корпус модели судна, инерционный сервопривод

### Благодарности

Работа поддержана грантами РФФИ 16-08-00997, 17-01-00672.

## IDENTIFICATION METHOD FOR VESSEL HULL HYDRODYNAMIC ADDED MOMENT OF INERTIA

A.S. Alyshv<sup>a,b</sup>, V.G. Melnikov<sup>a</sup><sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation<sup>b</sup> Navis Engineering, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation

Corresponding author: a.alyshv@navisincontrol.com

### Article info

Received 15.05.17, accepted 15.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-744-748

Article in Russian

**For citation:** Alyshv A.S., Melnikov V.G. Identification method for vessel hull hydrodynamic added moment of inertia. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 744–748 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-744-748

### Abstract

The paper proposes a new experimental method for identifying of the ship hull added moment of inertia with respect to the yaw angle. A short review of the existing methods, description of the experimental stand, testing procedure, and calculation formula is given. The proposed method is based on the energy approach with special reversion symmetric motions. For implementation of the proposed method, the vessel hull is fixed in the special testing stand where an elastic element is used as the main engine. For the exact symmetry of the programmed rotating motion, the servo drive with a flywheel is installed.

### Keywords

added moment of inertia, energy method, reversion symmetric motions, vessel model hull, inertial servo drive

### Acknowledgements

This work was supported by the RFBR Grant 16-08-00997, 17-01-00672.

В работе предложен новый экспериментальный метод для идентификации присоединенного момента инерции (ПМИ)  $\lambda_{66}$  корпуса судна по углу рыскания. При определении ПМИ обычно используют следующие допущения: принимают гипотезу квазистационарности, рассматривают идеальную несжимаемую безграничную жидкость, величины ПМИ при разгоне и торможении считают одинаковыми. Следует отметить, что в общем случае величины ПМИ могут зависеть от угловой скорости и ускорения, характера течения жидкости, волнообразования на свободной поверхности, ограниченной глубины, плотности среды, кривизны траектории, углов дрейфа, вязкости жидкости и т.д.

Аналитически осевые величины ПМИ вычисляют приближенно, принимая корпус за трехосный эллипсоид, либо используют метод плоских сечений в сочетании с методом комплексного потенциала [1]. Обычно полученные ПМИ полагаются приближенно постоянными для всех типов движения. Могут использоваться двухпараметрические шпангоутные сечения Льюиса или различные трехпараметрические, а также формулы, учитывающие отдельные особенности корпуса судна [2, 3]. Методы могут иметь ограничение на асимметрию корпуса. Также для вычисления ПМИ используется приближенное численное моделирование, программные пакеты вычислительной гидродинамики [4].

Среди экспериментальных методов определения ПМИ можно выделить испытания методом электрогидродинамической или магнитогидродинамической аналогии на основе аналогии между потоком идеальной жидкости и электрическим или магнитным полем [5, 6]; испытания на свободных и вынужденных крутильных колебаниях в опытовом бассейне с определением кривых колебаний модели [7, 8], на бифилярных подвесах [9], при помощи раскачивающих устройств на модели или на планарных механизмах с измерением приложенных усилий к модели с последующей обработкой результатов методом Фурье [10]; испытания на вибрационных установках [11, 12]. Обзоры данных методов и устройств, их реализующих, приведены в работах [13–15].

Предлагаемый метод, предназначенный для экспериментального определения ПМИ судов, состоит в следующем. Рассмотрим задачу о вращении в горизонтальной плоскости в неподвижной декартовой системе координат  $Oxyz$  корпуса судна 1 в опытном бассейне 2. Общий вид стенда изображен на рисунке. Точка  $O$  совпадает с центром масс корпуса. Плоскость  $Oxy$  совпадает с плоскостью невозмущенной поверхности воды. В начале эксперимента ось  $Ox$  лежит в продольной плоскости симметрии и направлена от центра в нос, ось  $Oy$  перпендикулярна продольной плоскости симметрии и направлена от центра к правому борту. Ось  $Oz$  направлена вниз. Корпус модели судна симметричен относительно плоскости  $Oxz$ . Обозначим  $\varphi$  – угол рыскания (курса) корпуса судна, при вращении отсчитываемый от оси  $Ox$  к продольной плоскости симметрии. Корпус закреплен вблизи плоскости мидельшпангоута в точке  $O$  таким образом, что может лишь вращаться вокруг оси  $Oz$ . Основным двигателем является упругий стержень (торсион) 3, обеспечивающий устройству высокую точность значения основной части прикладываемого усилия. Торсион, с одной стороны, неподвижно зафиксирован в опоре 4, с другой стороны, прикреплен скользящей заделкой к корпусу судна через жесткие стержни известной массы и геометрии. На уровне фальшборта судна установлен осесимметричный сервопривод. Снизу судно закреплено на валу 5, свободно вращающемся в подшипниках, закрепленных на дне бассейна, исключая вертикальные перемещения и крен судна. Влиянием вращения вала на движение жидкости пренебрегаем. Корпус погружен в опытовый бассейн по ватерлинию или с другой желаемой осадкой. Источником корректирующего момента является инерционный сервопривод, состоящий из электродвигателя 6 с закрепленным на его оси осесимметричным маховиком 7. Сервопривод расположен таким образом, что ось вращения вала электродвигателя совпадает с осью  $Oz$  судна. Угол поворота корпуса судна измеряется энкодером 8.

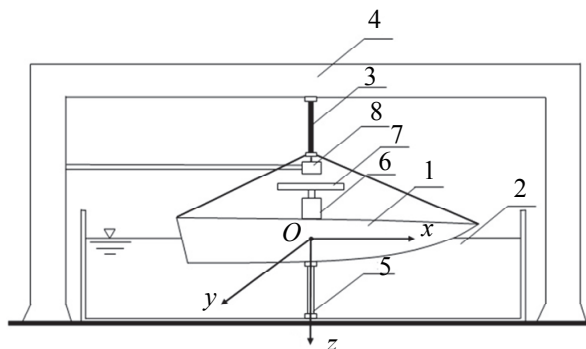


Рисунок. Схема испытательного стенда

Эксперимент по определению ПМИ проводится в несколько этапов. На первом этапе после предварительного закручивания торсиона на некоторый угол  $\varphi_0 \leq \pi$  рад и осуществления судном первоначального свободного разгонного участка движения рассматривается свободное замедленное движение

судна на угловом интервале  $\varphi \in [\varphi_1 \quad \varphi_2]$  на интервале времени  $t \in [t_1 \quad t_2]$ , на котором замеряется угол поворота судна и его угловая скорость. По множеству замеренных значений угла поворота корпуса судна определяется кинематическое уравнение вращения вида  $\varphi(t) = f(t)$ , на основании которого составляется уравнение второго этапа – обратного симметричного движения на том же угловом интервале при  $t \in [t_2 \quad 2t_2 - t_1]$ , либо  $t \in [t_2 + \Delta \quad 2t_2 - t_1 + \Delta]$ , при  $\Delta \geq 0$ , т.е. в момент реверса судна оно может быть остановлено внешними силами для отсчитывания времени  $\Delta$ , необходимого для успокоения жидкости. На втором этапе испытания по составленному уравнению вращательного движения выполняется управляемое симметричное обратное движение, корректируемое управляемым инерционным сервоприводом. Регулятор для следящей системы управления по углу вращения корпуса может быть построен на основе метода последовательного компенсатора [16]. Замеряются работа активного момента сил электродвигателя через подводимую энергию и значения угловой скорости маховика  $\Omega_z(t)$ . Для двух симметричных участков движения составляются динамические уравнения:

$$\begin{aligned} T_{\varphi_2} - T_{\varphi_1} + \Pi_{\varphi_2} - \Pi_{\varphi_1} &= C_{\varphi_1\varphi_2} + D_{\varphi_1\varphi_2}, \\ \tilde{T}_{\varphi_1} - \tilde{T}_{\varphi_2} + \Pi_{\varphi_1} - \Pi_{\varphi_2} &= A_{\varphi_2\varphi_1} + B_{\varphi_2\varphi_1} + C_{\varphi_2\varphi_1} + D_{\varphi_2\varphi_1}, \end{aligned}$$

где кинетическая энергия в момент реверса корпуса  $T_{\varphi_2} = \tilde{T}_{\varphi_2} = 0$ ;  $T_{\varphi_1}$  и  $\tilde{T}_{\varphi_1}$ ,  $\Pi_{\varphi_1}$  и  $\Pi_{\varphi_2}$  – кинетические и потенциальные энергии при замедленном и обратном ускоренном движении в соответствующих угловых положениях.

Удвоенная кинетическая энергия  $\tilde{T}_{\varphi_1}$  определяется следующим образом:

$$2\tilde{T}_{\varphi_1} = (J_{zz} + \lambda_{66} + J)\omega_z^2 + 2J\omega_z\Omega_z + J\Omega_z^2,$$

откуда, принимая  $\Omega_z = 0$ , рассчитывается величина  $2T_{\varphi_1}$ .

Работа пар сил  $A_{\varphi_2\varphi_1}$  крутящего момента  $M$  электродвигателя и работа  $B_{\varphi_2\varphi_1}$  момента сил трения  $M_d$  в подшипниках электродвигателя определяются из выражения

$$A_{\varphi_2\varphi_1} = \int_{t_2}^{2t_2-t_1} \eta M \Omega_z dt, \quad B_{\varphi_2\varphi_1} = - \int_{t_2}^{2t_2-t_1} M_d \Omega_z dt.$$

Коэффициенты модели момента сил трения считаются известными из паспорта электродвигателя или получаются при его идентификации. Получим выражение для удвоенной разности потенциальных энергий через крутящий момент  $M_t$ :

$$2(\Pi_{\varphi_1} - \Pi_{\varphi_2}) = M_t\varphi_1 - M_t\varphi_2 = c(\varphi_1^2 - \varphi_2^2),$$

где  $c$  – жесткость торсиона на кручение.

Применяя метод энергии [17–20] в предположении, что работы момента сопротивления жидкости  $C_{\varphi_1\varphi_2}$  и  $C_{\varphi_2\varphi_1}$  одновременно с работами момента трения в подшипниках вала  $D_{\varphi_1\varphi_2}$  и  $D_{\varphi_2\varphi_1}$  на двух симметричных движениях судна с симметричным корпусом приближенно равны между собой, имеем расчетную формулу:

$$\lambda_{66} = \frac{\int_{t_2}^{2t_2-t_1} (\eta M - M_d)\Omega_z dt - c(\varphi_1^2 - \varphi_2^2) - J\left(\frac{1}{2}\Omega_{\varphi_1}^2 + \omega_{\varphi_1}\Omega_{\varphi_1}\right)}{\omega_{\varphi_1}^2} - J_{zz} - J.$$

Здесь  $\omega_{\varphi_1}$  и  $\Omega_{\varphi_1}$  – угловые скорости корпуса судна и маховика в угловом положении  $\varphi = \varphi_1$ ,  $\eta$  – коэффициент потерь в электрической части двигателя,  $J$  – суммарный момент инерции маховика и ротора двигателя,  $J_{zz}$  – суммарный осевой момент инерции корпуса судна и статора электродвигателя. Для повышения точности измерения можно использовать трассерную визуализацию потока жидкости (PIV) [15], что позволит точнее выбрать границы интервала времени, когда поле скоростей жидкости менее всего имеет турбулентное течение.

В настоящей работе предложен метод экспериментального измерения ПМИ на основе энергетического подхода с использованием управляемого инерционного корректирующего привода, обеспечивающего требуемое программное вращение судна. Метод позволяет определять ПМИ с высокой точностью в широком диапазоне частот при допущении совпадения ПМИ при разгоне и торможении модели судна. Метод может быть применен при анализе мореходных качеств судов на этапах проектирования. Возможна модификация стенда для осуществления измерения по углам крена и дифферента с учетом восстанавливающих моментов в расчетной формуле. Результаты, полученные данным методом, могут применяться

для уточнения инерционных параметров математических моделей судоводительских тренажеров. Наибольшую актуальность результаты могут иметь в применении к судам с системой динамического позиционирования, с учетом их текущей осадки, как к системам с повышенными требованиями к точности выполнения цели управления.

В дальнейшем планируется модификация применения метода и устройства для определения ПМИ относительно произвольной оси вращения судна, с ледовой крошкой, а также непосредственное проведение испытаний со сравнением результатов с существующими методами.

## Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.-Л.: Гостехиздат, 1950. 678 с.
2. Sen D.T., Vinh T.C. Determination of added mass and inertia moment of marine ships moving in 6 degrees of freedom // *International Journal of Transportation Engineering and Technology*. 2016. V. 2. № 1. P. 8–14.
3. Тихонов В.И. Способ аналитического определения присоединенных масс жидкости // *Речной транспорт (XXI век)*. 2010. № 5. С. 81–82.
4. Крутько Е.С., Сорокин Ф.Д. Расчет присоединенной массы и коэффициента демпфирования вибрирующих в жидкости тел методом конечных объемов с приложением к расчету параметров пучка тзлов реактора ВВЭР-440 // *Известия вузов. Машиностроение*. 2013. № 8. С. 47–53.
5. Дитман А.О., Савчук В.Д. Аналоговый метод непосредственного определения присоединенных масс на электромагнитных моделях // *Ученые записки ЦАГИ*. 1978. Т. IX. № 6. С. 76–84.
6. Рязанов Г.А., Мамонов Ю.Н. Определение присоединенных моментов инерции методом ЭГДА с применением вихревого электрического поля // *Труды Новосибир. ин-т инж. водного транспорта*. 1958. № 25. С. 56–68.
7. Жуков Ю.Д., Клименко Е.К., Шестопал В.П. Мореходные качества корабля. Ч. III. Инструментальные средства изучения и методы контроля мореходных качеств корабля: Учеб. пособие. Николаев: НГТУ, 2007. 144 с.
8. Степанов А.П., Саломатин П.А. Способ определения присоединенного момента инерции самоходного плавсредства. А.с. СССР №1064176. Бюл. 1983. № 48.
9. Разумеев Ю.В., Ейбоженко А.В., Кодяков В.М., Родионов А.В., Юссеф М.Ю. Устройство для определения присоединенных масс, моментов инерции и демпфирования моделей судов методами их свободных колебаний в жидкости. Патент РФ №2425343. Бюл. 2011. № 21.
10. Lee S.K., Joung T.H., Cheon S.J., Jang T.S., Lee J.H. Evaluation of the added mass for a spheroid – type unmanned underwater vehicle by vertical planar motion mechanism test // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2011. V. 3(3). P. 174–180. doi: 10.3744/JNAOE.2011.3.3.174
11. Wu J.S., Hsieh M. An experimental method for determining the frequency-dependent added mass and added mass moment of inertia for a floating body in heave and pitch motions // *Ocean Engineering*. 2001. V. 28(4). P. 417–438. doi: 10.1016/S0029-8018(00)00008-1
12. Kumai T. Added mass moment of inertia induced by torsional vibration of ships // *European Shipbuilding*. 1958. P. 93–100.
13. Korotkin A.I. Added masses of ship structures // *Fluid Mechanics and its Applications*. 2009. V. 88. P. 1–391. doi: 10.1007/978-1-4020-9432-3\_1
14. Алышев А.С. Обзор методов идентификации присоединенных моментов инерции судов // *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО*. 2016. Т. I. С. 57–60.
15. Кленов А.И., Ветчанин Е.В., Килин А.А. Экспериментальное определение присоединенных масс тела методом буксировки // *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. 2015. Т. 25. № 4. С. 568–582. doi: 10.20537/vm150413
16. Фаронов М.В., Пыркин А.А. Адаптивное управление нелинейными системами с неточно заданной относительной степенью в условиях полной параметрической неопределенности // *Материалы докладов XIV*

## References

1. Loitsyanskii L.G. *Mechanics of Liquid and Gas*. Moscow, Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1950, 678 p. (in Russian)
2. Sen D.T., Vinh T.C. Determination of added mass and inertia moment of marine ships moving in 6 degrees of freedom. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 8–14.
3. Tikhonov V.I. The method of analytical determination of the attached liquid masses. *River Transport (XXI<sup>st</sup> century)*, 2010, no. 5, pp. 81–82. (In Russian)
4. Krut'ko E.S., Sorokin F.D. The calculation of added masses and damping coefficients of vibrating bodies in a fluid by the finite volume method as applied to the calculation of the fuel bundle parameters for the reactor VVER-440. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 8, pp. 47–53. (In Russian)
5. Ditman A.O., Savchuk V.D. Analog method for direct determination of attached masses on electromagnetic models. *TsAGI Science Journal*, 1978, vol. 9, no. 6, pp. 76–84. (In Russian)
6. Ryazanov G.A., Mamonov Yu.N. Opredelenie prisoedinennykh momentov inertsiy metodom EGDA s primeneniem vikhrevogo elektricheskogo polya. *Proc. Novosibirsk Institute of River Transport*, 1958, no. 25, pp. 56–68. (In Russian)
7. Zhukov Yu.D., Klimentko E.K., Shestopal V.P. *Seaworthiness of the Ship. Part III. Instrumental Means of Study and Methods of Control of Ship's Seaworthiness: Textbook*. Nikolaev, NGGU Publ., 2007, 144 p.
8. Stepanov A.P., Salomatina P.A. *Sposob Opredeleniya Prisoedinnennogo Momenta Inertsii Samokhodnogo Plavsredstva*. Certificate of Authorship USSR no. 1064176, 1983.
9. Razumeev J.V., Ejbozhenko A.V., Kodjakov V.M., Rodionov A.V., Josef M.J. *Device for determination of connected weight, inertia moments and damping of models of vessels by methods of their free oscillations in liquid*. Patent RU2425343, 2011.
10. Lee S.K., Joung T.H., Cheon S.J., Jang T.S., Lee J.H. Evaluation of the added mass for a spheroid – type unmanned underwater vehicle by vertical planar motion mechanism test. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2011, vol. 3, pp. 174–180. doi: 10.3744/JNAOE.2011.3.3.174
11. Wu J.S., Hsieh M. An experimental method for determining the frequency-dependent added mass and added mass moment of inertia for a floating body in heave and pitch motions. *Ocean Engineering*, 2001, vol. 28, no. 4, pp. 417–438. doi: 10.1016/S0029-8018(00)00008-1
12. Kumai T. Added mass moment of inertia induced by torsional vibration of ships. *European Shipbuilding*, 1958, pp. 93–100.
13. Korotkin A.I. Added masses of ship structures. *Fluid Mechanics and its Applications*, 2009, vol. 88, pp. 1–391. doi: 10.1007/978-1-4020-9432-3\_1
14. Alyshev A.S. Overview of methods for identifying the ships inertia moments. *Almanac of Scientific Works of Young Scientists of ITMO University*, 2016, vol. 1, pp. 57–60. (In Russian)
15. Klenov A.I., Vetchanin E.V., Kilin A.A. Experimental determination of the added masses by method of towing. *Bulletin of Udmurt University. Mathematics, Mechanics, Computer Science*, 2015, vol. 25, no. 4, pp. 568–582. (In Russian) doi: 10.20537/vm150413
16. Faronov M.V., Pyrkin A.A. Adaptive control of nonlinear

- конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». Санкт-Петербург, 2012. С. 498–505.
17. Melnikov G.I., Dudarenko N.A., Melnikov V.G., Alyshev A.S. Parametric identification of inertial parameters // *Applied Mathematical Sciences*. 2015. V. 9. N 136. P. 6757–6765. doi: 10.12988/ams.2015.59584
  18. Алышев А.С., Мельников В.Г., Мельников Г.И. Идентификация момента инерции маятниковой системы в условиях вязкого трения // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. Т. 16. № 5 (105). С. 928–935. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-928-935
  19. Мельников В.Г. Энергетический метод параметрической идентификации тензоров инерции тел // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2010. №1. С. 59–63.
  20. Melnikov V.G. A new method for inertia tensor and center of gravity identification // *Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications*. 2005. V. 63. N 5-7. P. e1377–e1382. doi: 10.1016/j.na.2005.02.001
- systems with an inaccurately given relative degree under complete parametric uncertainty. *Proc. of XIV Conference of Young Scientists on Navigation and Motion Control*. St. Petersburg, 2012, pp. 498–505. (In Russian)
17. Melnikov G.I., Dudarenko N.A., Melnikov V.G., Alyshev A.S. Parametric identification of inertial parameters. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, vol. 9, no. 136, pp. 6757–6765. doi: 10.12988/ams.2015.59584
  18. Alyshev A.S., Melnikov V.G., Melnikov G.I. Identification method for pendulum system moment of inertia with viscous damping. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 928–935. (In Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-928-935
  19. Melnikov V.G. An energy method for parametrical identification of object inertia tensors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 1, pp. 59–63. (In Russian)
  20. Melnikov V.G. A new method for inertia tensor and center of gravity identification. *Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications*, 2005, vol. 63, no. 5-7, pp. e1377–e1382. doi: 10.1016/j.na.2005.02.001

### Авторы

**Алышев Александр Сергеевич** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер-исследователь, АО Навис, Санкт-Петербург, 199106, Российская Федерация, a.alyshev@navisincontrol.com

**Мельников Виталий Геннадьевич** – доктор технических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, V.G.Melnikov@yandex.ru

### Authors

**Alexander S. Alyshev** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; engineer-researcher, Navis Engineering, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation, a.alyshev@navisincontrol.com

**Vitaly G. Melnikov** – D.Sc., Associate Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, V.G.Melnikov@yandex.ru