

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-20-27
УДК 629.5.018.2

Я.В. Иванова, В.М. Котлович, В.М. Сидоров
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ НОРМИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЗОНДОВ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются пяти- и шеститочечные пространственные зонды, а также гребенки из них, используемые в гидродинамических испытаниях комплексов моделей с гребными винтами в глубоководном опытовом бассейне. Цель работы состоит в модернизации программно-аппаратного комплекса «Канал-3», обеспечивающего проведение эксперимента по определению нормировочных коэффициентов гребенок (тарирование).

Материалы и методы. Нормировка зондов осуществляется с использованием программно-аппаратных средств и координатного устройства КУ-68. Расчет нормировочных коэффициентов реализуется методом двухпараметрической аппроксимации. При этом необходимо вычислить и учесть поправку на нецентровку координатного устройства.

Основные результаты. Разработано новое программное обеспечение для осуществления автоматизированного сбора и обработки данных эксперимента по тарированию зондов и гребенок. Впервые реализован математический расчет поправок, связанных с нецентровкой координатного устройства КУ-68. Результаты испытаний используются при измерении полей скоростей и давлений в плоскости диска гребного винта за корпусом модели судна. Использование новой программы позволило повысить удобство проведения испытаний и сократить время обработки результатов измерений в несколько раз.

Заключение. Проведена модернизация программно-аппаратного комплекса «Канал-3», обеспечивающего проведение эксперимента по определению нормировочных коэффициентов гребенок из пяти- и шеститочечных зондов.

Ключевые слова: гидродинамические зонды, модельные испытания, автоматизация, сбор данных, численный расчет.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-20-27
UDC 629.5.018.2

Ya. Ivanova, V. Kotlovich, V. Sidorov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

TEST AUTOMATION AND NUMERICAL CALCULATION OF CALIBRATION PARAMETERS FOR WAKE PROBES

Object and purpose of research. This paper studies five- and six-point spatial probes, as well as their rakes used in hydrodynamic tests of models with propellers in KSRC Deepwater Towing Tank. The purpose of this work was to upgrade Kanal 3 software & hardware system supporting calibration tests of wake rakes.

Materials and methods. Probes are calibrated by means of software and hardware tools, as well as by means of KU-68 coordinate device. Calibration coefficients are calculated through biparametric approximation. Here, correction to the non-aligned position of the coordinate device has to be calculated and taken into account.

Main results. New software has been developed for automated acquisition and processing of data on probe and rake calibration. The novel feature of calculations is that now they take into account the non-alignment correction for KU-68

Для цитирования: Иванова Я.В., Котлович В.М., Сидоров В.М. Автоматизация испытаний и численный расчет нормировочных характеристик гидродинамических зондов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 20-27.

For citations: Ivanova Ya., Kotlovich V., Sidorov V. Test automation and numerical calculation of calibration parameters for wake probes. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 20-27 (in Russian).

coordinate device. Test results are used in measurements of velocity and pressure fields in the propeller plane behind the model. The new software made these tests handier and their data processing several times faster.

Conclusion. *Kanal-3* hardware and software complex supporting experimental determination of calibration coefficients for wake rakes made up by five- and six-point probes has been successfully upgraded.

Keywords: wake probes, model tests, automation, data acquisition, numerical calculation.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Введение

Introduction

Одним из видов гидродинамических испытаний комплексов моделей с гребными винтами, реализуемых в глубоководном опытовом бассейне, является экспериментальное определение полей скоростей и давлений потока, набегающего на движитель судна. При обтекании корпуса модели в месте расположения движителя возникают возмущения однородного на бесконечности потока. Движитель проектируется с использованием данных анализа пространственных неоднородностей потока, обусловленных телесностью корпуса и его выступающих частей, вязкостью воды и связанных с изменением в данной точке пространства скорости и давления в потоке.

Методика проведения такого рода испытаний была разработана в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова в конце 60-х – начале 70-х гг. Экспериментальными инструментами в них и сегодня, наряду с зондами простых типов (полнонапорные и статические трубки, трубки Пито – Прандтля или гребенки из них), являются пространственные гидродинамические пяти- и шеститочечные зонды, которые, несмотря на инерционность и ограниченные возможности измерения нестационарных скоростей и давлений, обеспечивают получение осредненных по времени параметров течения.

Поначалу автоматизация экспериментов основывалась на системе «Канал-1» – созданной в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова ЭВМ, связанной со всеми буксировочными тележками бассейна и обеспечивавшей измерения средних показаний частотных датчиков исследуемых параметров, в том числе датчиков давления. Ввиду недостаточности технической развитой на тот момент электронной вычислительной техники все математические расчеты приходилось выполнять вручную с помощью логарифмической линейки и механических машинок. Знание радиального распределения средней по окружностям продольной скорости в месте расположения винта, работающего за моделью, позволяло приспособить геометрию винта – радиальное распределение шагов – к потоку с точки зрения оптимизации попульсивных качеств судна.

В дальнейшем, в связи с проблемой подавления шума движителя, связанного с кавитацией лопастей, и шумом его вращения, актуальным стало изучение окружной неоднородности поля продольных скоростей [1]. Полная скорость потока, натекающего на гребной винт, практически равна ее продольной составляющей, поэтому для решения данной задачи, как правило, было достаточно по-прежнему применять простые зонды.

Расширившиеся к этому времени возможности вычислительной техники позволяли автоматизировать проведение экспериментов всех типов, в том числе исследования скоростей и давлений в диске винта. В этой связи в 1981 г. была разработана система «Канал-2», основанная на применении ЭВМ СМ-1, которыми оснащалась каждая из буксировочных тележек. Программное обеспечение по исследованию полей скоростей разработала инженер-программист Е.Г. Федорова¹ по техническому заданию В.М. Котловича. В этом программном обеспечении было предусмотрено использование не только простых, но и пространственных зондов. Пространственные зонды нашли особенно широкое применение в связи с разработкой современных водометных движителей.

Последняя версия этого программно-аппаратного комплекса «Канал-3» была создана в начале 90-х гг. и включала в основном новую аппаратную базу – персональные компьютеры. Программное обеспечение, выполненное на алгоритмическом языке Pascal, принципиально не изменилось. Комплекс «Канал-3» имел больше функциональных возможностей и расширенный интерфейс пользователя. Однако к 2013 г. технические возможности системы значительно устарели. Кроме того, высокие мировые темпы развития вычислительной техники и, в частности, повышение ее быстродействия и объема памяти позволили реализовать переход на современную программную и аппаратную базу.

¹ Авторы выражают глубокое уважение и признательность Е.Г. Федоровой за многолетний труд по автоматизации экспериментов в ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

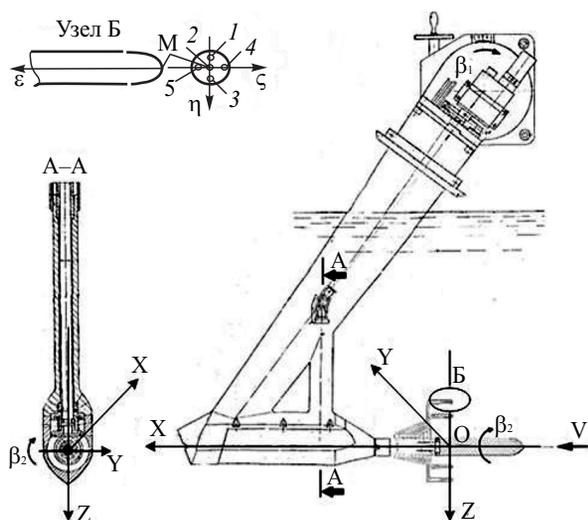


Рис. 1. Общий вид тарировочного устройства КУ-68 и монтажа двух гребенок (всего 4 зонда), а также принятые системы координат и нумерация приемных отверстий пятиточечных зондов

Fig. 1. General view of KU-68 calibration device and mounting of two rakes (4 probes in total), as well as adopted coordinate systems and numbering of receptacles for five-point probes

Целью работы являлась модернизация комплекса «Канал-3». Модификация аппаратной части заключалась в выборе и внедрении современных средств сбора данных, обеспечивающих необходимую точность и скорость измерений. Основная часть работы была связана с написанием нового программного обеспечения. Требования включали в себя не только дублирование функциональных возможностей системы «Канал-3», но и ряд дополнительных особенностей, а именно, расширенный интерфейс графической обработки и возможности редактирования данных на всех этапах измерений. Наиболее важное требование – автоматический расчет оптимальных аппроксимационных зависимостей для каждого зонда и включение в него определения поправок на нецентровку устройства КУ-68.

Порядок проведения эксперимента. Основные расчетные соотношения

Test procedure. Principal formulas

При проведении измерений полей скоростей и давлений в диске гребного винта за корпусом судна используются гидродинамические зонды

и гребенки из них. В зависимости от локальной скорости натекания потока изменяется величина давления на поверхности зонда, которая измеряется датчиками в месте положения приемных отверстий на кончике зонда. По измеренным значениям этих давлений осуществляется расчет вектора скорости в данной точке пространства. При определении же нормировочных характеристик зондов решается обратная задача. С одной стороны, задаются внешние условия обтекания: скорость V_0 невозмущенного потока, равная скорости буксировочной тележки, и давление P в нем. С другой – ориентация относительно невозмущенного потока тарировочных зондов. Ориентация зондов и гребенок осуществляется координатным устройством КУ-68 (рис. 1) и определяется углами скоса потока относительно продольной оси: скос в радиальной плоскости – углом δ , скос в трансверсальной плоскости – углом α . В качестве примера рассмотрим параметры пятиточечных зондов. Все закономерности и расчеты для шеститочечных зондов выполняются аналогичным образом (за исключением давления в диске винта).

Пятиточечные гидродинамические зонды [2] представляют собой некоторые тела: цилиндры со сферическим концом или крестообразно спаянные друг с другом пять трубок – пятитрубчатый зонд (центральная трубка – приемник полного напора, периферийные скошены и служат для определения углов скоса потока и давления в нем). С помощью датчиков давления измеряются гидродинамические давления $P_i - P_0$ в приемных отверстиях зонда ($i = 1-5$). Для всех зондов данной гребенки значения углов α и δ одинаковы. Одновременно может быть смонтировано несколько гребенок (как правило, две), причем начальное положение каждой из них характеризуется полярным углом θ_0 . От конструкции координатного устройства зависит соотношение между углами скоса потока (относительно связанных с зондами систем осей), с одной стороны, и углами β_1 и β_2 , определяющими поворот зонда относительно устройства КУ-68 и регистрируемыми датчиками, с другой. Однако ввиду того, что тарировочное устройство монтируется на буксировочной тележке с некоторой погрешностью относительно направления набегающего на зонды потока, необходимо учесть углы отклонения дренированного вала устройства – углы нецентровки. Таким образом, итоговые значения углов скоса потока определяются по формулам [3]

$$\alpha = (\beta_1 + \Delta_z) \sin(\beta_2 + \theta_0) + \Delta_y \cos(\beta_2 + \theta_0); \quad (1)$$

$$\delta = (\beta_1 + \Delta_z) \cos(\beta_2 + \theta_0) - \Delta_y \sin(\beta_2 + \theta_0), \quad (2)$$

где Δ_z и Δ_y – углы нецентровки координатника КУ-68 относительно неподвижных осей OZ и OY соответственно.

В процессе тарирования требуется определить коэффициенты гидродинамических давлений в месте расположения приемных отверстий и рассчитать их комбинации. По измеренным с помощью датчиков давления значениям находятся безразмерные тарировочные коэффициенты:

$$K_P^T(\alpha, \delta, V) = \bar{P}_6; \quad (3)$$

$$K_V^T(\alpha, \delta, V) = \bar{P}_2 - \bar{P}_6 = \bar{P}_{26}; \quad (4)$$

$$K_\delta^T(\alpha, \delta, V) = \frac{\bar{P}_1 - \bar{P}_3}{\bar{P}_2 - \bar{P}_6} = \frac{\bar{P}_{13}}{\bar{P}_{26}}; \quad (5)$$

$$K_\alpha^T(\alpha, \delta, V) = \frac{\bar{P}_5 - \bar{P}_4}{\bar{P}_2 - \bar{P}_6} = \frac{\bar{P}_{54}}{\bar{P}_{26}}, \quad (6)$$

$$\text{где } \bar{P}_i = \frac{P_i - P_0}{\rho V_0^2 / 2} \text{ и } \bar{P}_{ih} = \bar{P}_i - \bar{P}_h = \frac{P_i - P_h}{\rho V_0^2 / 2} -$$

безразмерные гидродинамические давления и их разность; $\bar{P}_6 = (\bar{P}_1 + \bar{P}_3 + \bar{P}_4 + \bar{P}_5)/4$ – расчетное выражение тарировочного коэффициента избыточных давлений в точке измерений для пятиточечных зондов (у шеститочечных зондов этот параметр измеряется непосредственно).

Если тарировочные коэффициенты не зависят от скорости, то V в формулах (3)–(6) опускается. Для удобства использования все тарировочные зависимости представляются в виде функций от K_α^T и K_δ^T .

Нормировочные зависимости зондов, являющиеся функциями тех или иных аргументов, могут быть введены либо как массив соответствующей размерности (используется на БТ-1), либо в форме аналитических аппроксимационных кривых. Самыми распространенными из них являются полиномы степени m от двух аргументов:

$$F_n(K_\alpha, K_\delta) = \sum_{k=0}^m \sum_{j=0}^k a_{nj} K_\alpha^j K_\delta^{(k-j)}, \quad (7)$$

где a_{nj} – искомые коэффициенты нормировочных полиномов.

В качестве F_n могут выступать функции α , δ , K_P или K_V ($n = 1..4$), рассчитанные, соответственно, по формулам (1)–(6).

Процедура поиска коэффициентов a_{nj} – двухпараметрическая аппроксимация расчетных зависимостей – программно реализуется методом наименьших квадратов. В настоящее время такая аппроксимация является стандартной процедурой при использовании зондов в опытовых бассейнах, что позволяет автоматически осреднять случайный разброс экспериментальных данных при тарировке. Модельные испытания по определению полей скоростей и давлений в диске гребного винта, работающего за корпусом судна, проводятся с использованием кривых (7).

Основные результаты

Main results

Для обеспечения автоматизированного сбора данных была выбрана плата фирмы National Instruments NI PCI-6536. Оборудование этой компании широко используется при проведении испытаний и зарекомендовало себя как надежное и простое в эксплуатации. Технические характеристики платы удовлетворяют всем требованиям проводимых испытаний. Она имеет 32 канала цифрового ввода-вывода, этого достаточно для любого эксперимента, проводимого в глубоководном опытовом бассейне. Например, в испытаниях, описываемых в данной работе, задействовано 24 канала. В дальнейшем планируется переход от измерения осредненных значений к динамическим измерениям мгновенных значений. Для этих целей была выбрана плата с максимальной рабочей частотой 25 МГц.

Структурная схема разработанного программно-аппаратного комплекса приведена на рис. 2, а на рис. 3 – алгоритм работы программы.

Оригинальная часть работы состояла в создании нового программного обеспечения. В качестве языка разработки была выбрана среда графического программирования LabVIEW, возможности которой включают гибкий пользовательский интерфейс, удобство работы с основными интерфейсами передачи данных и открытый программный код, что важно для дальнейшего совершенствования проектах [4, 5]. Кроме того, в ней имеются инструменты для реализации сложных математических алгоритмов и численных методов, что уже использовалось авторами в других работах, например в [6].

Была написана программа TarГреб56.exe, включающая в себя следующие модули: ввод, работа, пересчет и обработка. Сбор данных обеспечивался программой опроса платы NI PCI-6536 [5].

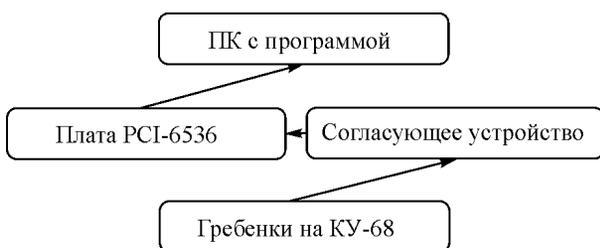


Рис. 2. Структурная схема проведения тарировочных испытаний

Fig. 2. Flow chart of calibration tests

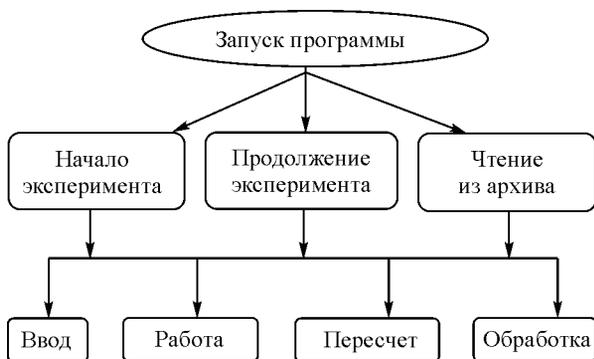


Рис. 3. Алгоритм работы программы

Fig. 3. Software operation algorithm

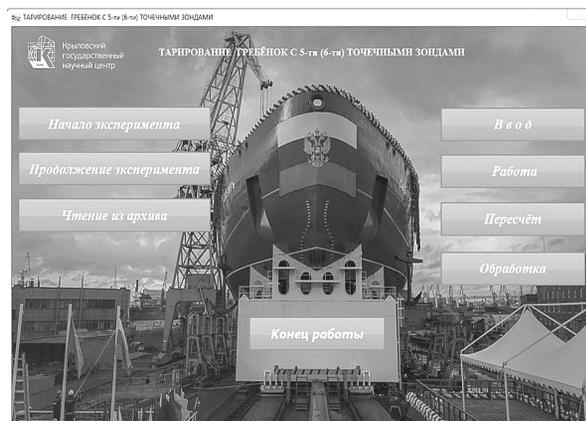


Рис. 4. Лицевая панель главной программы TarProp56.exe

Fig. 4. Main window of principal program, CalProp56.exe

Предусмотрена возможность проведения эксперимента с самого начала, продолжения эксперимента (исходные данные сохранены) и чтения из архива с целью обработки или пересчета с другими исходными данными. Лицевая панель программы представлена на рис. 4.

Модульная структура и основной функционал перенесен из версии «Канал-3». В модуле «Ввод» выполняется задание исходных данных, параметров и конфигурация эксперимента в зависимости от количества гребенок, зондов, типа зондов и пр. При этом учитываются пределы измерения для каждого датчика давления.

Модуль «Работа» выполняет следующие функции:

- установка угла координатного устройства в вертикальной плоскости β_1 и угла поворота дренированного вала КУ-68 с гребенками β_2 ;
- получение измеренной информации при нулевой скорости буксировочной тележки – начальных показаний датчиков (режим «Начальные»);
- опрос датчиков давления при заданных условиях рабочего пробега тележки;
- вычисление размерных и безразмерных характеристик (режим «Рабочая точка»);
- просмотр и вывод на печать вычисленных данных и просмотр вычисленной информации в графическом представлении (на экране 6 графиков для одного зонда, зонды можно выбирать);
- удаление рабочей точки.

На рис. 5 и 6 (см. вклейку) соответственно показаны форма протокола, обеспечивающего выполнение этих действий, и графическое представление результатов вычислений. Последние накапливаются и сохраняются в рабочем файле, в который записываются все данные для возможности продолжения эксперимента. Предусмотрена печать исходных данных эксперимента по запросу оператора.

Модуль «Обработка» выполняет редактирование результатов измерений, включающее работу с таблицей данных отдельно для каждого зонда – удаление точки, замена значений функций. Все изменения фиксируются в специальном журнале. Любое изменение можно отменить по желанию пользователя (режим «Редактор»).

Основная доля математических операций осуществляется в режиме «Обработка» рис. 7, 8 (см. вклейку), который включает аппроксимацию характеристик и вычисление углов нецентровки. Производится двухпараметрическая аппроксимация функций α , δ , K_V или K_P . Для каждой из них строится полиномиальная функция, аргументами которой являются K_α и K_δ . Степень полинома определяется программой автоматически путем последовательной аппроксимации со 2 по 5 степень и выбора в качестве оптимальной той, для которой количество точек с отклонением от ап-

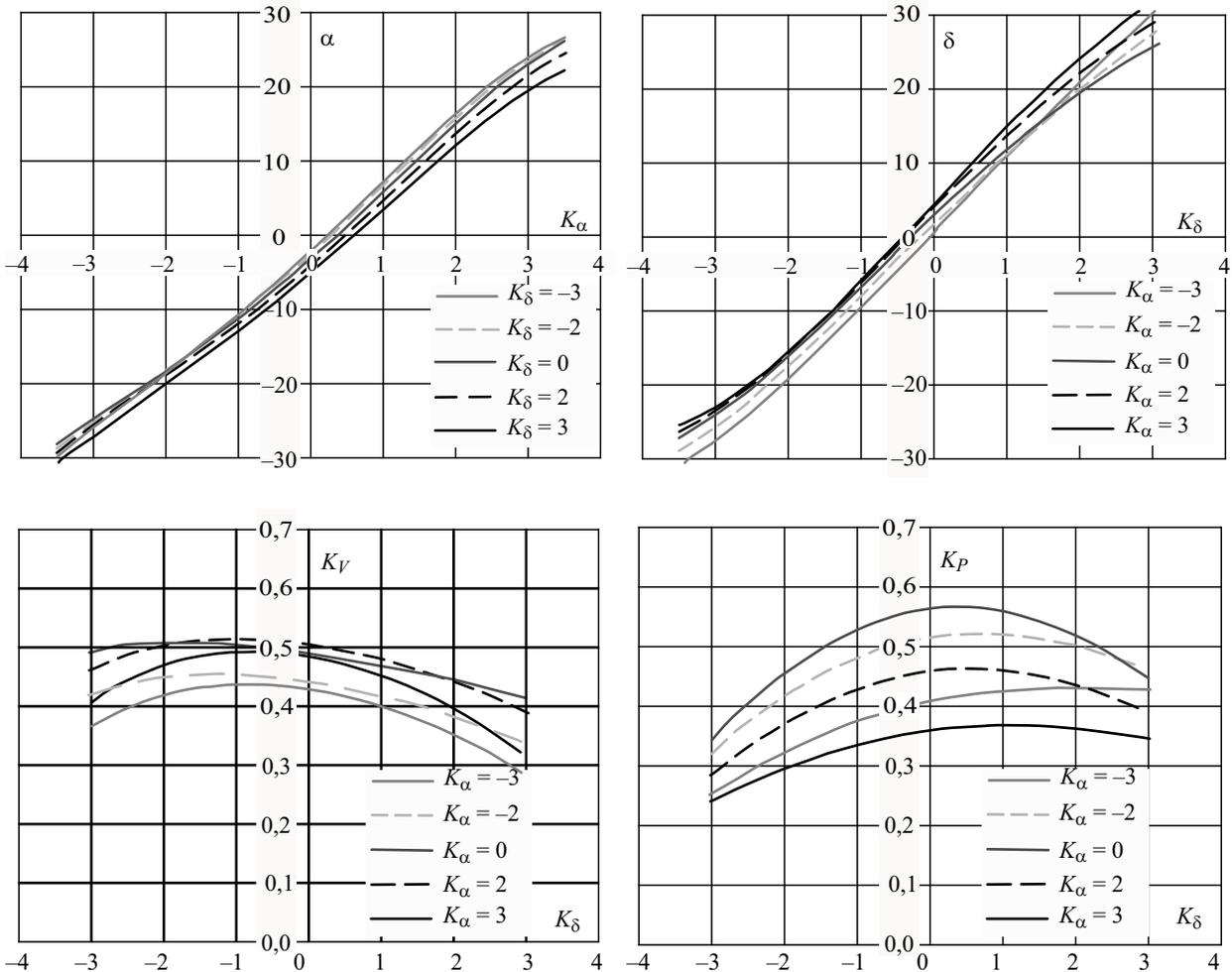


Рис. 9. Полученные нормировочные зависимости для функций α , δ , K_V и K_P

Fig. 9. Obtained calibration formulas for α , δ , K_V and K_P functions

проксимационной кривой, превышающим СКО, минимально. Аппроксимация производится методом Гаусса. Матрица коэффициентов строится в соответствии с процедурой последовательного итерационного умножения по двум вложенным циклам (изначально процедура создана на алгоритмическом языке Pascal).

Наборы полученных коэффициентов аппроксимации $\alpha_{\text{нjk}}$ для каждой из функций α , δ , K_V или K_P являются искомыми для построения нормировочных кривых. Данные сохраняются в текстовых файлах. Кроме того, для каждого сеанса обработки может быть записан свой рабочий файл, что позволяет проводить повторную обработку.

В настоящее программное обеспечение впервые включен расчет поправок на нецентровку КУ-68.

Расчет реализован в соответствии с [3] методом наименьших квадратов, исходя из обусловленных нецентровкой синусо- ($\Delta K_\alpha(\beta_2)$) и косинусообразных ($\Delta K_\delta(\beta_2)$) отклонений фактически замеренных значений $K_\alpha(\beta_2)$ и $K_\delta(\beta_2)$ от истинных величин тарировочных коэффициентов $K_{\alpha 0}$ и $K_{\delta 0}$ при малых значениях (0 и 5°) внешнего параметра – угла β_1 : $\Delta K_\alpha(\beta_2) = K_\alpha(\beta_2) - K_{\alpha 0}$ и $\Delta K_\delta(\beta_2) = K_\delta(\beta_2) - K_{\delta 0}$. Типичные значения углов нецентровки составляют порядка $\pm 0,5^\circ$ по каждой из осей Y и Z , что соответствует 5–10 % от наиболее часто встречающихся углов скоса потока до $\sim 10^\circ$. Процедура расчета длится не дольше секунды и значительно повышает точность проводимых испытаний.

После внесения поправок на нецентровку координатного устройства КУ-68 полученные тари-

ровочные коэффициенты используются в программе эксперимента по определению полей скоростей и давлений в потоке корпуса модели судна, натекающем на диск гребного винта. Наглядное представление о функциях α , δ , K_V и K_P дают графики рис. 9.

Как видно, тарифовочная зависимость α (K_α , K_δ) в основном определяется коэффициентом K_α , а δ (K_α , K_δ), наоборот, величиной K_δ . Коэффициенты K_V и K_P , в отличие от α , δ , являются выраженными функциями обоих аргументов.

В программе также предусмотрен отдельный модуль «Пересчет», который позволяет откорректировать и распечатать исходные данные, выполнить пересчет всей измеренной информации автоматически (без вмешательства оператора), выбрать для пересчета блок измеренной информации («начальная точка», «конечная точка», в этом случае в таблице показаний можно откорректировать углы), производить сравнительный анализ полученных данных с первоначальными, выводить графически результаты вычислений, а также производить печать или сохранение в файл протокола.

Заключение

Conclusion

1. В ходе проведенной модернизации программно-аппаратного комплекса «Канал-3» была реализована новая система сбора и обработки данных, которая используется для измерения скорости буксировочной тележки и избыточных давлений, воспринимаемых приемными отверстиями тарируемых зондов, для первичной математической обработки и анализа полученных данных в испытаниях по определению нормировочных зависимостей гребенок пяти- и шеститочечных зондов в глубоководном опытовом бассейне.
2. Функциональные возможности разработанного программного обеспечения заключаются в автоматизации процесса измерения давлений при проведении эксперимента и в комплексной обработке полученных данных для определения нормировочных зависимостей для тарифовочных коэффициентов каждого зонда в гребенке.
3. Впервые программно реализована методика учета поправки на нецентровку координатного устройства.
4. Индикация ключевых зависимостей и оптимизированный алгоритм расчета позволили сокра-

тить время на проведение обработки результатов в несколько раз.

Библиографический список

1. Справочник по теории корабля / Под ред. Я.И. Войткунского. Т. 1. Л.: Судостроение, 1985.
2. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэромеханические измерения. Методы и приборы. М.: Наука, 1964.
3. Котлович В.М. Уточнение тарифовок пространственных зондов путем определения нецентровки координатного устройства и введения соответствующих поправок // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 91(375). С. 69–82.
4. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2011.
5. Федосов В.П., Нестеренко А.К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW. М.: ДМК Пресс, 2007.
6. Иванова Я.В., Зубков В.И. Численный расчет коэффициента прозрачности легированной гетероструктуры с квантовой ямой методом внутренней задачи // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 5. С. 5–8.

References

1. Ship Theory. Reference book. Vol. 1. Under editorship of Ya. Voitkunsky. L.: Sudostroyeniye, 1985 (*in Russian*).
2. Gorlin S., Slezinger I. Aeromechanical measurements. Methods and hardware. M.: Nauka, 1964 (*in Russian*).
3. Kotlovich V. Updating calibration of 3D probes by determination of misalignment for the coordinate device and introduction of corresponding corrections // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2016. Issue 91(375). P. 69–82 (*in Russian*).
4. Travis J., Kring J. LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun (*Russian translation*). M.: DMK Press, 2011.
5. Fedosov V., Nesterenko A. Digital processing of signals in LabVIEW. M.: DMK Press, 2007 (*in Russian*).
6. Ivanova Ya., Zubkov V. Numerical calculation of transparency coefficient for a doped heterostructure with quantum well by method of internal problem // Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University. 2018. No. 5. P. 5–8 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Иванова Яна Владимировна, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 748-64-19. E-mail: Ya_Ivanova@ksrc.ru
Котлович Валерий Михайлович, к.т.н., старший научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург,

Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 748-64-19. E-mail: valya1937@yandex.ru.

Сидоров Виталий Михайлович, начальник стенда ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 748-64-19. E-mail: V_Sidorov@ksrc.ru.

About the authors

Yana V. Ivanova, Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post

code 196158. Tel.: 8 (812) 748-64-19. E-mail: Ya_Ivanova@ksrc.ru.

Valery M. Kotlovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 748-64-19. E-mail: valya1937@yandex.ru.

Vitaly M. Sidorov, Test Rig Manager, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 748-64-19. E-mail: V_Sidorov@ksrc.ru.

Поступила / Received: 10.07.18
Принята в печать / Accepted: 08.11.18
© Коллектив авторов, 2018