

УДК 004.923

DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.007

Проблемы бесконтактной регистрации потоков в гидродинамической трубе

Новиков Михаил Михайлович¹, Ипполитов Евгений Викторович¹,
Камаев Сергей Валентинович¹, Марков Михаил Александрович¹,
Князь Владимир Александрович², Степаньянц Дмитрий Георгиевич²

¹Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, Россия, Шатура, novikov@rambler.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «ГосНИИ авиационных систем», Россия, Москва

Аннотация. Гидродинамическая труба является одним из эффективных инструментов для изучения процесса обтекания крыла в аэродинамике и гидродинамике, позволяющих изучать характеристики потока в контролируемых условиях и моделировать условия, которые не могут быть изучены в реальном полете. Методы визуализации потока, такие, как цветные струи или мелкие частицы, позволяют получать качественные данные о поведении потока, являясь ценным средством для понимания особенностей течения. В то же время более интересно иметь количественные характеристики потока, позволяющие прогнозировать развитие процессов обтекания и разрабатывать рекомендации для повышения безопасности. Представленное исследование направлено на разработку системы бесконтактных трехмерных измерений в гидродинамической трубе на основе фотограмметрических методов. Предложена оригинальная модель визуализации, учитывающая эффекты преломления в случае нескольких оптических сред (воздух-стекло-жидкость), которая обеспечивает пространственную точность измерений. Эта модель реализована в экспериментальной фотограмметрической системе, оценка точности приводится как для калибровки системы, так и для измерения аэродинамической модели. Разработанная методика калибровки фотограмметрической системы продемонстрировала применимость ее для задачи трехмерных измерений в гидродинамической трубе.

Ключевые слова: трехмерные измерения, трехмерная калибровка, преломление, оптическая среда, фотограмметрия

Цитирование: Новиков М.М. Проблемы бесконтактной регистрации потоков в гидродинамической трубе / М.М. Новиков, Е.В. Ипполитов, С.В. Камаев, М.А. Марков, В.А. Князь, Д.Г. Степаньянц // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 95-107. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.007.

Введение. Безопасность полетов является одним из наиболее важных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации воздушного судна. Очень опасно и в большинстве случаев невозможно изучать характеристики самолета в реальных критических условиях полета, поэтому для анализа поведения потока обычно используется физическое моделирование в аэродинамических или гидродинамических трубах. Адекватность такого моделирования обеспечивается сходством моделируемого процесса с реальным. Концепция подобия позволяет распространить результаты модельных экспериментов на реальный процесс, если они оба имеют геометрическое, кинематическое и динамическое сходство. В аэродинамике набор безразмерных величин, таких, как число Маха, число Рейнольдса, число Прандтля, используется для установления сходства модели и реального процесса течения. Гидродинамическая труба является одним из эффективных средств для изучения процессов обтекания летательных аппаратов в аэродинамике [1]. Она позволяет моделировать особые условия и изучать характеристики потока обтекания, которые не могут быть исследованы в реальном полете (рис. 1).

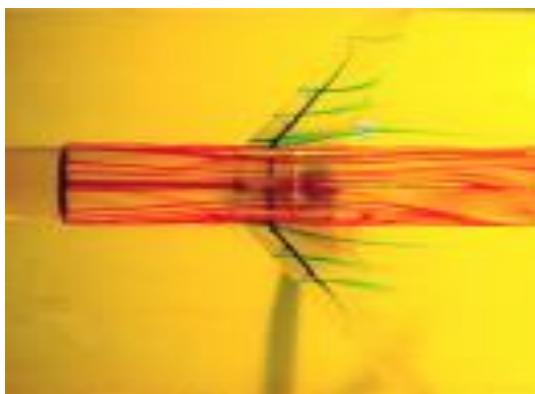


Рис. 1. Визуализация потока обтекания с помощью краски в гидродинамической трубе (стереолитографическая модель с внутренними каналами)

Для проведения бесконтактных трёхмерных измерений в гидродинамических трубах фотограмметрическими методами требуется уточнение стандартной модели формирования изображения в съёмочной камере, учитывающее эффект преломления лучей на границах оптических сред, а именно, на границе воздух – стекло и стекло – рабочая жидкость. В статье представлена модель формирования изображения для случая съёмки в рабочем пространстве, включающем различные оптические среды, и методика калибровки оптической системы для проведения трёхмерных измерений координат объектов сцены с учётом имеющихся границ оптических сред.

Оптические 3D-измерения, основанные на обработке изображений объекта, получают все большее распространение в связи с совершенствованием технических средств получения изображений и значительным прогрессом в методах их обработки. В то же время диапазон применений также расширяется, включая приложения, требующие измерений в рабочей области, включающей несколько оптических сред, что влияет на процесс формирования изображения измеряемого объекта [2].

Большинство применений, требующих учета эффектов преломления света при оптических измерениях, относятся к подводным исследованиям, таким, как мониторинг подводных объектов по производству энергии, подводный мониторинг корпусов судов [3], картирование рельефа морского дна и 3D-реконструкция сложных подводных сооружений [4, 5].

Необходимым условием обеспечения точности измерений фотограмметрическими методами является калибровка системы сбора данных, которая позволяет достоверно оценивать параметры, учитывающие геометрические искажения при формировании изображения. Методы калибровки фотограмметрических систем, как видимого [6, 7], так и теплового диапазонов, разработанные для трёхмерных измерений в однородной оптической среде, сегодня позволяют обеспечивать высокую точность трёхмерных измерений, достигающую $1/100000$ измерительного рабочего пространства. Для обеспечения высокой точности оптических измерений в случае границ оптических сред разрабатываются различные методы и подходы для компенсации или учета влияния геометрических искажений, вызванных эффектами преломления [8, 9].

Ряд подходов для компенсации эффектов преломления используют тот факт, что они исчезают, если свет проходит через границу среды под углом 90° , и заключаются в использовании дополнительных оптических элементов для минимизации или устранения эффектов преломления. В случае анализа потока жидкости с использованием методов стереоскопических измерений скорости частиц (PIV – particle image velocimetry) применение призм является распространённым решением для предотвращения оптических aberrаций [10]. При использовании призм оптические лучи проходят через границу раздела под углом 90° , что практически исключает эффекты преломления.

Другим подходом, обеспечивающим необходимую точность оптических измерений, является калибровка оптической системы, которая позволяет учитывать влияние преломления и компенсировать вызванные им искажения.

Оценка погрешности, вносимой в оптические мультимедийные 3D-измерения без учета рефракции, позволила предложить методологию реализации в современном фотограмметрическом рабочем процессе, основанном на методах «структура по движению» и «стерео с несколькими видами» [11]. Предлагаемый подход к коррекции рефракции применяется на уровне фотографии, что позволяет реализовать его в рамках существующих технологий. Результаты, полученные для двух тестовых площадок по сравнению с эталонными данными, продемонстрировали, что предложенный алгоритм может уменьшить ошибки, вызванные рефракцией, в два раза, независимо от глубины.

Существенно распространенным методом является включение («поглощающих») эффектов преломления в физические калибровочные параметры камеры [12]. Этот метод обеспечивает довольно хорошее описание модели искажения для случая, когда оптическая ось камеры приблизительно перпендикулярна плоскости или куполообразному отверстию камеры, а основной эффект преломления через границу раздела радиально симметричен относительно основной точки. Недостатком этого метода «поглощения эффектов преломления» является то, что всегда существуют некоторые систематические ошибки, которые не учитываются в модели. Эффект преломления делает недействительным предположение об едином центре проекции для камеры [8, 13], которое является основой для этой модели.

Альтернативные подходы предлагают решения для геометрической коррекции путем введения виртуального проекционного центра [14] или двухэтапной коррекции [15], включающей первоначальную стандартную калибровку в воздухе с последующим введением дополнительных параметров, описывающих эффекты преломления на границах оптических сред.

1. Модели визуализации.

1.1. Стандартная модель формирования изображения (одна оптическая среда).

Для случая одиночных оптических сред моделью изображения являются уравнения нелинейности:

$$x_a - x_p = -\mu R \cdot (X_A - X_C) \quad (1)$$

которые выражают связь между точкой **A** объекта и соответствующей точкой **a** в плоскости изображения с предположением, что изображение формируется лучом, проходящим через центр проекции **C** (рис. 2).

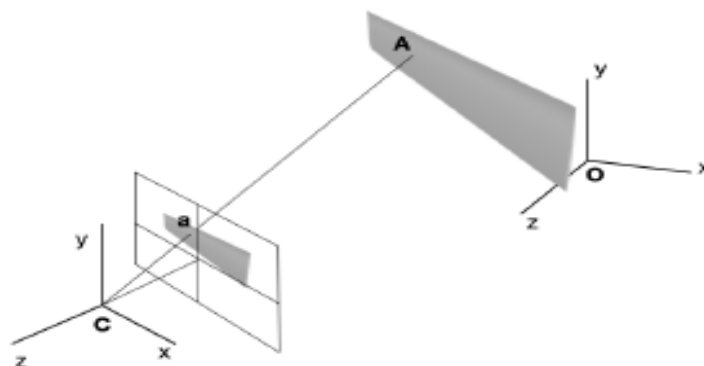


Рис. 2. Путь светового луча через одну оптическую среду (стандартный случай)

В уравнении 1 координаты $X_A = (X_A, Y_A, Z_A)^T$ точки сцены **A** и координаты $X_C = (X_C, Y_C, Z_C)^T$ центра проекции **C** заданы в объектной системе координат OXYZ. Координаты $x_a = (x_a, y_a, -c)^T$ точки изображения **a** и координаты $x_p = (x_p, y_p, -c)^T$ главной точки **p** заданы

в системе координат изображения C_{xyz} (рис. 2). Матрица R определяет преобразование координат из объектной системы координат $OXYZ$ в систему координат изображения C_{xyz} , и μ – масштабный коэффициент. Уравнение 1 представляет собой идеальную модель визуализации, основанную на геометрической оптике. Получение реального изображения подвержено искажениям, которые должны быть определены и компенсированы для точного 3D-измерения. Для моделирования геометрических искажений в уравнения коллинеарности добавляются дополнительные члены Δx и Δy . Затем действительные (искаженные) координаты \tilde{x} , \tilde{y} точки на изображении определяются как:

$$\tilde{x} = x + \Delta x \quad (2)$$

$$\tilde{y} = y + \Delta y \quad (3)$$

Практика фотограмметрических измерений доказала, что хорошим описанием нелинейных искажений является модель Брауна-Конради [16]. Для текущего исследования используется в следующей форме [17]:

$$\Delta x = a_0 y + x(a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6) + a_4(r^2 + 2x^2) + 2a_5 xy \quad (4)$$

$$\Delta y = a_0 x + y(a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6) + a_5(r^2 + 2y^2) + 2a_4 xy \quad (5)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$.

Здесь

x, y – координаты точки a на изображении,

a_0, \dots, a_5 – параметры внутренней ориентации камеры:

a_0 – коэффициент аффинных искажений;

a_1, a_2, a_3 – коэффициенты радиальных искажений;

a_4, a_5 – коэффициенты тангенциальных искажений.

Параметры нелинейных искажений должны быть определены в результате процедуры калибровки.

Модель формирования изображения для двух и более оптических сред. Для оптических 3D-измерений объекта, расположенного в гидродинамической трубе, луч света из точки объекта A в соответствующую точку изображения a проходит через две границы разных оптических сред, которые изменяют направление луча, и уравнение 1 становится недействительным.

На рис. 3 представлен путь от точки объекта A до плоскости изображения для луча, который формирует точку изображения a . Преломление света на границе раздела жидкость-стекло и на границе раздела стекло-воздух разбивает луч на три вектора: r^1 для воздуха, r^2 для стекла и r^3 для жидкости.

Для вектора r^1 с координатами изображения $(x, y, -c)^T$ его координаты в системе координат объекта $(X_1, Y_1, Z_1)^T$ определяются как:

$$r^1 = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = R^T \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} \quad (6)$$

Положение стеклянного окна гидродинамического туннеля определяется системой координат $\Omega X_g Y_g Z_g$, которая имеет начало координат в точке Ω . Оси X_g и Y_g находятся в плоскости поверхности стекла, а ось Z_g перпендикулярна. Положение системы координат стекла в системе координат объекта определяется координатами начальной точки Ω и матрицей вращения R_g (рис. 3).

Чтобы установить связь между точкой объекта A и его изображением a , необходимо определить векторы r_1, r_2, r_3 . Вектор r_1 берет свое начало в центре проекции C . В системе координат $\Omega X_g Y_g Z_g$ вектор r_1 определяется уравнениями (7), (8):

$$C_g = R_g \cdot (C - \Omega) \quad (7)$$

$$r_g^1 = R_g \cdot r^1 \quad (8)$$

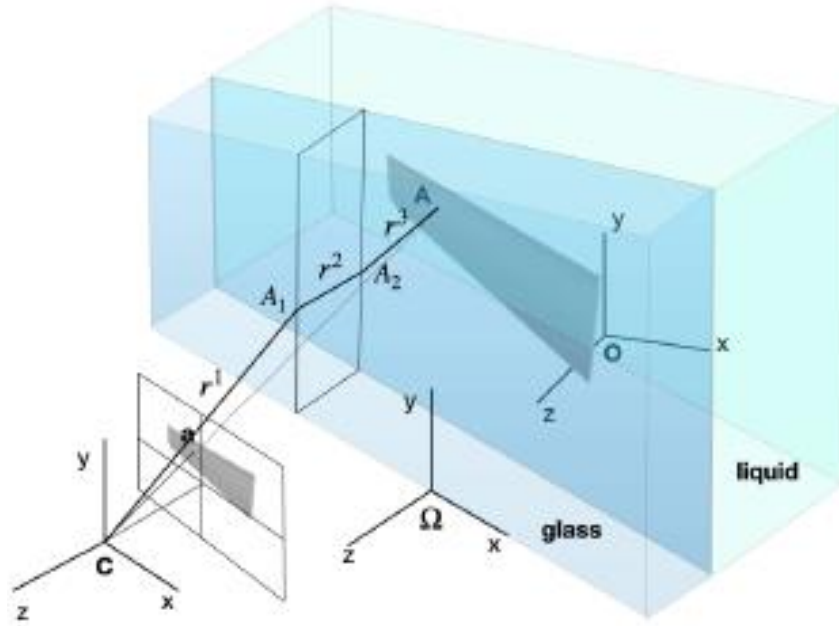


Рис. 3. Траектория светового луча для случая двух нескольких оптических сред

Местоположение точки A_1 в системе координат $\Omega X_g Y_g Z_g$ определяется с использованием условия $Z_{gA_1} = 0$:

$$A_{1g} = C_g - \frac{Z_{gc}}{Z_{ga}} \cdot r_g^1 \quad (9)$$

Направление вектора r^2 определяется с использованием закона Снелла:

$$r^2 = \begin{pmatrix} r_x^2 \\ r_y^2 \\ r_z^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_x^1 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_2) \\ r_y^1 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_2) \\ r_z^1 \end{pmatrix}, \sin(\varphi_2) = \frac{1}{n_1} \cdot \sin(\varphi_1) \quad (10)$$

где n_1 - коэффициент преломления на границе раздела воздух-стекло, φ_1 - угол наклона луча r^1 , φ_2 - угол преломления.

Началом координат вектора r^3 является точка A_2 , которую можно найти как:

$$A_{2g} = A_{1g} + r_g^2 \quad (11)$$

И направление вектора r^3 определяется аналогичным образом:

$$r^3 = \begin{pmatrix} r_x^3 \\ r_y^3 \\ r_z^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_x^2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_3) \\ r_y^2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_3) \\ r_z^2 \end{pmatrix}, \sin(\varphi_3) = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin(\varphi_2) \quad (12)$$

где n_2 - коэффициент преломления на границе раздела стекло-жидкость, φ_2 - угол наклона луча r^2 , φ_3 - угол преломления.

Преобразование из системы координат $\Omega X_g Y_g Z_g$ в систему координат объекта задается формулой:

$$A_2 = R_g^T \times A_{g2} \quad (13)$$

$$r^2 = R_g^T \times r_g^2 \quad (14)$$

Уравнения (6) – (14) дают соотношение между любой точкой изображения a и лучом света r^2 в жидкости, который образует эту точку изображения. Являясь своего рода аналогом уравнения нелинейности (уравнение 1), они могут быть использованы для калибровки камеры и определения трехмерных координат объекта.

2. Экспериментальная установка.

2.1. Гидродинамическая труба. Разработанная методика и оптическая 3D-измерительная система предназначены для регистрации потока и 3D-измерений в гидродинамической трубе ГТД-400 Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ). Гидродинамическая труба ГТД-400 имеет площадь поперечного сечения 400×400 мм и обеспечивает скорость потока от 20 мм/с до 100 мм/с. Большая емкость с рабочей жидкостью, расположенная над рабочей частью трубы, создает поток за счет силы тяжести. Для обеспечения заданных характеристик потока передача жидкости из контейнера в рабочую часть осуществляется через специальный конфузор (участок проточного канала (трубы) в виде усеченной пирамиды или усеченного конуса) и соты в начале рабочей части. Адекватность моделирования поведения потока обеспечивается поддержанием критериев подобия для моделируемых и реальных потоков. Возможность применения цветных струй для визуализации потока и низкие скорости потока являются заметными преимуществами гидродинамической трубы. Испытания в гидротрубе ГТД-400 ЦАГИ проводятся с целью выявления особенностей физики обтекания компоновки путем вывода красителя на поверхность модели в зонах вихреобразования (наплывы, изломы передней кромки, ПГО, концевая часть крыла) при обтекании модели потоком жидкости. При этом происходит визуализация областей образования вихревых жгутов и положения точки взрыва вихря при больших углах атаки, определяются области отрыва потока, оценивается возможность попадания вихревых жгутов в воздухозаборники двигателей. С учетом размеров рабочей части ГТД-400 разработанная оптическая 3D-измерительная система рассчитана на рабочее пространство $300 \times 300 \times 300$ мм.

2.2. Лабораторная установка. Экспериментальная установка для оценки разработанных алгоритмов калибровки системы и 3D-измерений в разных оптических средах состоит из фотограмметрической системы "Mosca"22 и резервуара для воды, размещенного в рабочем пространстве оптической измерительной системы.

Фотограмметрическая 3D-измерительная система включает в себя две камеры DMK 37BUX273 с КМОП-сенсором Sony IMX273LLR и проектор структурированного света, установленный на жесткой платформе, обеспечивающий стабильную ориентацию снаружи (рис. 4). Основные характеристики камеры DMK 37BUX273 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Спецификация камеры DMK 37BUX273

Parameter	Value
Sensor type	CMOS Pregius
Format	1/2.9"
Dynamic range	10 bit
Resolution	1440 X 1080
Pixel size	3.45 μm X 3.4 μm
Frame rate	up to 238 fps
Shutter	1 μs to 30 s
Lens	6 mm

Экспериментальная установка на этапе калибровки показана на рис. 4.

Для выполнения оценки точности измерений разработанные алгоритмы были внедрены в оригинальное программное обеспечение оптической измерительной системы «Mosca», служащее базовым программным обеспечением для задач 3D-сканирования и захвата движения [18, 19].

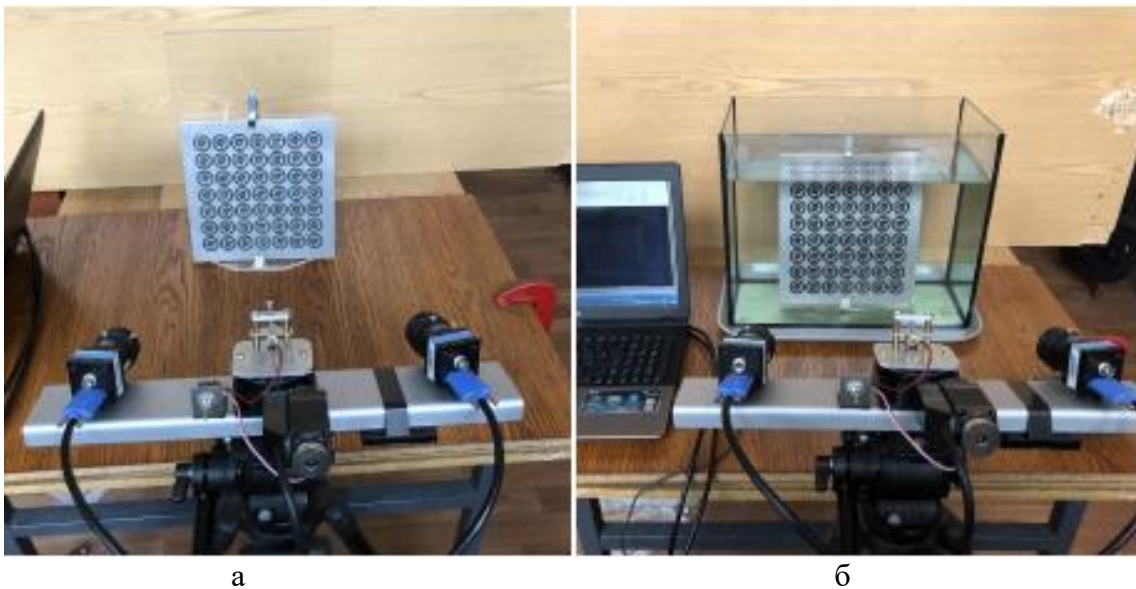


Рис. 4. Экспериментальная установка: (а) получение изображения одна оптическая среда (б) получение изображения для нескольких оптических сред

2.3. Метод калибровки. Калибровка, как процесс определения неизвестных параметров модели изображения, является необходимой процедурой для обеспечения необходимой точности оптических измерений. Широко используемый подход к калибровке заключается в использовании набора изображений специального тестового поля с известными 3D-координатами некоторых опорных точек. Затем неизвестные параметры модели оцениваются с использованием координат изображения опорных точек в качестве наблюдений.

Оригинальная методика калибровки [20] была применена для определения параметров внутренней ориентации оптической 3D-измерительной системы. Методика основана на отображении плоского тестового поля, отмеченного специальными кодированными мишенями [21], что обеспечивает высокую степень автоматизации процесса калибровки.

Для калибровки был получен набор стереопар изображений для различного пространственного и углового положения тестового поля, так что каждая контрольная точка появилась в другом месте в рабочем пространстве.

Для калибровки одной среды вектор оценочных параметров $v^{sm} = \{v_{io}^{sm}, v_{eo}^{sm}\}$ состоит из: параметров внутренней ориентации $v_{io}^{sm} = (m_x, m_y, b_x, b_y, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)^T$ и параметров внешней ориентации $v_{eo}^{sm} = (X_c, Y_c, Z_c, \alpha, \omega, k)^T$. Координаты опорных точек были приняты как известные, определенные предварительным независимым точным измерением.

Для мультимедийной калибровки вектор оценочных параметров

$$v^{mm} = \{v_{io}^{mm}, v_{eo}^{mm}, v_{gs}^{mm}\} \text{ включает:}$$

параметры внутренней ориентации $v_{io}^{mm} = (m_x, m_y, b_x, b_y, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)^T$,
параметры внешней ориентации $v_{eo}^{mm} = (X_c, Y_c, Z_c, \alpha, \omega, k)^T$ и параметры, определяющие положение стеклянной системы координат $v_{gs}^{mm} = (X_\Omega, Y_\Omega, Z_\Omega, \alpha_\Omega, \omega_\Omega, k_\Omega)^T$.

3. Результаты и обсуждение. Чтобы оценить точность разработанной методики калибровки, процедура калибровки была выполнена для одного оптического носителя и для мультимедийной оптической среды с использованием одного и того же тестового поля. Набор из 18 стереопар изображений был использован для калибровки как для случая с одним оптическим носителем, так и для случая с несколькими носителями. Предполагается, что показатели преломления стекла и жидкости известны.

Опорные точки на изображениях обнаруживаются и идентифицируются в автоматическом режиме, их координаты на изображении определяются с субпиксельной точностью с помощью алгоритма распознавания целей [21]. Эти координаты рассматриваются как наблюдения в процедуре оценки наименьших средних квадратов для определения неизвестных параметров в моделях визуализации. Результаты калибровки приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры калибровки

Параметр	Значение калибровки			
	Одна оптическая среда		Несколько оптических сред	
m_x, mm	0,00343605	0,00343856	0,00343504	0,00344048
m_y, mm	0,00343513	0,00343760	0,00343459	0,00343890
x_p, pix	746,36	763,32	731,47	739,15
y_p, pix	598,67	575,17	617,47	554,58
a_0	-0,0005603900	-0,0004854600	-0,0005578440	-0,0005089372
a_1	0,0111441600	0,0115739600	0,0112679379	0,0119275824
a_2	0,0004579200	0,0003412100	0,0004684494	0,0003360935
a_3	-0,0000340900	-0,0000382200	-0,0000329905	-0,0000400445
a_4	-0,0000169700	-0,0001148000	-0,0000164739	-0,0001193517
a_5	0,0001380500	-0,0001100600	0,0001425155	-0,0001049068

В качестве меры точности калибровки использовались два показателя: 1 – среднеквадратичная ошибка в положениях для контрольных точек испытательного поля; 2 – расстояние от «облака точек» до «облака точек» для поверхностей эталонного объекта [22]. Для иллюстрации в таблице 3 представлены результаты процедуры относительной ориентации для обоих случаев.

Таблица 3. Параметры относительной ориентации

Угол	Значение, град	
	Одна оптическая среда	Несколько оптических сред
α_0	10.42	10.95
κ_0	-0.34	-0.29
α_1	-14.76	-14.22
ω_1	0.88	0.91
κ_1	0.84	0.82

В таблице 3 показано хорошее соответствие параметров относительной ориентации при использовании алгоритмов калибровки для несколько оптических сред. После процедуры регулировки системы среднее остаточное значение в контрольных точках составило 0,033 мм для стандартного случая (одна оптическая среда – воздух) и 0,035 мм для случая размещения образца в стеклянном резервуаре с водой (несколько оптических сред воздух-стекло-вода). Эта точность достаточна для решения задач исследования обледенения аэродинамических конструкций в гидродинамической трубе ГДТ-400.

В качестве эталонного образца для оценки точности оптических трехмерных измерений использовалась цифровая модель крыла, спроектированная средствами компьютерного моделирования (рис. 5а), предназначенная для изучения во время экспериментов в гидродинамической трубе ГДТ-400. Эта цифровая модель использовалась для изготовления пластиковой копии (рис. 5б) методом лазерной стереолитографии на лазерном стереолитографе ЛС-400 (ИПЛИТ РАН). В результате трехмерного сканирования пластиковой копии с помощью фотограмметрической системы получается система трехмерных координат поверхности объекта, которая называется «облаком точек».



Рис. 5. Экспериментальная проверка калибровки а) цифровая модель крыла (б) пластиковая копия цифровой модели крыла для экспериментов

В дальнейшем проводилось программное сравнение поверхностей эталонного объекта с облаком точек. Для пространственного совмещения и оценки точности при сравнении цифровой модели и облака точек использовалось программное обеспечение CloudCompare 3D point cloud и mesh processing с открытым исходным кодом (<https://www.cloudcompare.org>). Размерная шкала отображает расхождение результатов измерений в мм.

На рис. 6 представлены результаты сравнения трехмерного сканирования крыла с эталонной цифровой моделью. Можно отметить наличие не полного совпадения облака точек трехмерного сканирования с цифровой моделью, что, скорее всего, связано с геометрическими искажениями от объемной усадки при изготовлении методом лазерной стереолитографии.

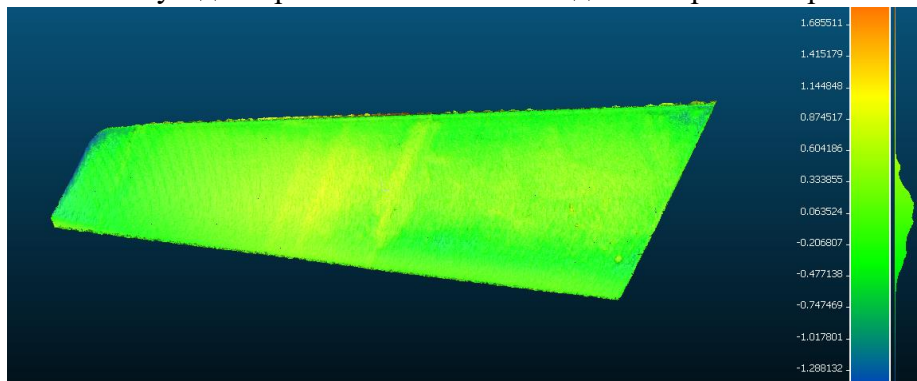


Рис. 6. Сравнение результатов 3D-сканирования пластиковой копии с цифровой моделью

На рис. 7 приведены результаты сравнения облаков точек для двух трехмерных сканирований пластиковой копии модели крыла: полученных в стандартном случае (одна оптическая среда) и в случае размещения образца в стеклянном резервуаре с водой. Показано, что трехмерная реконструкция поверхности в случае нескольких оптических сред с очень высокой степенью соответствует поверхности, полученной в стандартных условиях.

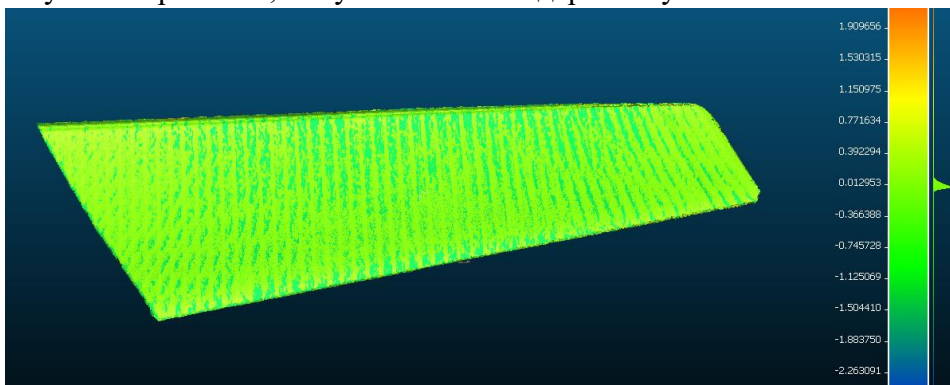


Рис. 7. Результаты сравнения двух трехмерных сканирований: одна оптическая среда и для случая нескольких оптических сред

Заключение. Разработана модель формирования изображения для случая нескольких оптических сред с разными показателями преломления. Модель непосредственно учитывает эффект преломления светового луча на границе раздела двух сред и использует модель искажения Брауна-Конради. Разработанные алгоритмы реализованы в фотограмметрической трехмерной измерительной системе и экспериментально оценены в лабораторных условиях. Проведенная экспериментальная оценка разработанной фотограмметрической системы доказала высокую точность калибровки системы и оптических трехмерных измерений в неоднородной оптической среде. После процедуры регулировки системы среднее остаточное значение в контрольных точках составило 0,033 мм для стандартного случая (одна оптическая среда – воздух) и 0,035 мм для случая размещения образца в стеклянном резервуаре с водой (нескольких оптических сред воздух-стекло-вода). Эта точность достаточна для решения задач исследования обледенения аэродинамических конструкций в гидродинамической трубе ГДТ-400. Разработанная методика калибровки фотограмметрической системы и трехмерных измерений продемонстрировала применимость ее для задачи трехмерного анализа потока в гидродинамической трубе.

Благодарности. Данная работа сделана при финансовой поддержке РФФИ (Грант МК №19-29-13040). Работа по лазерной стерелитографии выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (Государственное задание ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН).

Список источников

1. Головкин М.А. Визуализация структур течения в окрестности моделей летательных аппаратов в гидродинамической трубе малых скоростей (самолетные аэродинамические компоновки) / М.А.Головкин, Е.В. Головкина // Труды МАИ, 2016. – Выпуск № 90. – С. 1-17.
2. Knyaz V.A., Stepaniants D.G., Ippolitov E.V., Novikov M.M. Optical 3d measurements in hydrodynamic tunnel for aircraft icing study. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2020, XLIII-B2-2020, pp.963-968.
3. Shortis M. Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems. Sensors, 2015, 15(12), pp. 30810-30826.
4. Drap P., Merad D., Hijazi B., Gaoua L., Nawaf M.M., Saccone M., Chemisky B., Seinturier J., Sourisseau J.-C., Gambin T., Castro F. Underwater photogrammetry and object modeling: A case study of xlendi wreck in malta, Sensors, 2015, 15(12), pp.30351-30384.
5. Nocerino E., Menna F. Photogrammetry: Linking the world across the water surface. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(128), pp.2-36.
6. Vo M.N., Wang Z., Luu L., Ma J. Advanced geometric camera calibration for machine vision. Optical Engineering, 2011, 50(11), pp.1-4.
7. Sedlazeck A., Koch R. Perspective and non-perspective camera models in underwater imaging –overview and error analysis. Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 212-242
8. Murase T., Tanaka M., Tani T., Miyashita Y., Ohkawa N., Ishiguro S., Suzuki Y., Kayanne H., Yamano H. A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2008, 74(9), pp. 1129-1136.
9. Gonzarlez-Vera A.S., Wilting T.J.S., Holten A.P.C., van Heijst G.J.F., Duran-Matute M. High-resolution single-camera photogrammetry: incorporation of refraction at a fluid interface. Exp Fluids, 2020, 61(1), pp. 1-19.
10. Skarlatos D., Agrafiotis P. A novel iterative water refraction correction algorithm for use in structure from motion photogrammetric pipeline. Journal of Marine Science and Engineering, 2018, 6(3).
11. Menna F., Nocerino E., Fassi F., Remondino F. Geometric and optic characterization of a hemispherical dome port for underwater photogrammetry. Sensors, 2016, 16(1).
12. Chadebecq F., Vasconcelos F., Lacher R., Maneas E., Desjardins A., Ourselin S., Vercauteren T., Stoyanov D. Refractive two-view reconstruction for underwater 3d vision. International Journal of Computer Vision, 2019.
13. Telem G., Filin S. Photogrammetric modeling of underwater environments. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(5), pp. 433-444.

14. Braeuer-Burchardt C., KuEhmstedt P., Notni G. Combination of air- and water-calibration for a fringe projection based underwater 3d-scanner. Computer analysis of images and patterns, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp.49-60.
15. Agrafiotis P., Karantzalos K., Georgopoulos A., Skarlatos D. Correcting image refraction: Towards accurate aerial image-based bathymetry mapping in shallow waters. Remote Sensing, 2020, 12(2).
16. Brown D. Decentering distortion of lenses. Photogrammetric Engineering, 1966, 32(3), pp. 444-462.
17. Beyer H. Advances in characterization and calibration of digital imaging systems. Int. arch. photogramm. Remote sens. Spatial inf. sci, 1992, XXIX, pp.545-555.
18. Knyaz V.A. Scalable photogrammetric motion capture system “mosca”: Development and application. International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2015, XL-5/W6, pp.43-49.
19. Knyaz V.A., Zheltov S.Y., Vishnyakov B.V. Robust object tracking techniques for vision-based 3D motion analysis applications. Optics, photonics and digital technologies for imaging applications IV, International society for optics and photonics SPIE, 2016, 9896, pp. 334-342.
20. Князь В.А. Калибровка оптической системы для трёхмерных измерений в гидродинамической трубе / В.А. Князь, Д.Г. Степаньянц, О.Ю. Царева // Компьютерная оптика, 2021. – т. 45. – № 1. – С. 58-65.
21. Knyaz V.V., Grodzitskiy L., Knyaz V.A. Deep learning for coded target detection. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2021, XLIV-2/W1-2021, pp. 125-130.
22. Knyaz V., Zheltov S. Accuracy evaluation of structure from motion surface 3D reconstruction. Videometrics, range imaging, and applications XIV, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2017, 10332, pp. 200-209.

Новиков Михаил Михайлович. Старший научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, SPIN: 3713-0429, AuthorID: 38807, ORCID: 0000-0003-0626-793X, novikov@rambler.ru, 140700, Россия, г.Шатура, МО, ул.Святоозерская, д.1.

Ипполитов Евгений Викторович. Научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, SPIN: 3694-9798, AuthorID: 1043880, ORCID: 0000-0002-0622-6727, ippevg@ya.ru, 140700, Россия, г. Шатура, МО, ул.Святоозерская, д.1.

Камаев Сергей Валентинович. Старший научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, SPIN: 1473-2930, AuthorID: 38809, ORCID: 0000-0001-7423-1264, ksv6@rambler.ru, 140700, Россия, г. Шатура, МО, ул.Святоозерская, д.1.

Марков Михаил Александрович. Старший научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, AuthorID: 3713-0429, ORCID: 0000-0003-1054-2615, markov@shatura.laser.ru, 140700, Россия, г. Шатура, МО, ул.Святоозерская, д.1.

Князь Владимир Александрович. Руководитель отделения, кандидат технических наук Федеральное государственное унитарное предприятие «ГосНИИ авиационных систем», SPIN: 8014-4229, AuthorID: 120975, ORCID: 0000-0002-4466-244, knyaz@gosniias.ru, 125319, Россия, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7.

Степаньянц Дмитрий Георгиевич. Кандидат технических наук, руководитель сектора в Федеральном государственном унитарном предприятии «ГосНИИ авиационных систем», SPIN: 4539-8453, AuthorID: 443238, robin8081@gmail.com, 125319, Россия, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7.

UDC 004.923

DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.007

Problems of non-contact registration of flows in a hydrodynamic tube

Mikhail M. Novikov¹, Evgene V. Ippolitov¹, Serge V. Kamaev¹, Mikhail A. Markov¹
Vladimir A. Knyaz², Dmitriy G. Stepaniants²

¹ILIT RAS – Branch of the FSRC Crystallography and Photonics of Russian Academy of Sciences, Russia, Shatura, novikov@rambler.ru

²State Research Institute of Aviation System (GosNIIAS), Russia, Moscow

Abstract. The hydrodynamic tube is one of the most effective tools for studying the process of wing flow in aerodynamics and hydrodynamics. This makes it possible to study the flow characteristics under controlled conditions and simulate conditions that could not be studied in real flight. Flow visualization methods, such as colored jets or fine particles, allow us to obtain qualitative data on the behavior of the flow, being a valuable tool for understanding the flow features. But it is more interesting to have quantitative flow characteristics that allow us to predict the development of flow processes and develop recommendations for improving safety. The presented research is aimed at developing a system of contactless three-dimensional measurements in a hydrotube based on photogrammetric methods. An original visualization model is proposed that takes into account the effects of refraction in the case of several optical media (air-glass-liquid), which provides spatial accuracy of measurements. This model is implemented in an experimental photogrammetric system, an accuracy estimate is given both for the calibration of the system and for the measurement of the aerodynamic model. The developed method of calibration of the photogrammetric system has demonstrated its applicability to the problem of three-dimensional measurements in a hydrodynamic tube.

Keywords: three-dimensional measurements, calibration, refraction, optical medium, photogrammetry

Acknowledgements: This work was done with the financial support of the RFBR (Grant mk No. 19-29-13040). The work on laser stereolithography was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education (the State task of the Federal Research Institute "Crystallography and Photonics" of the Russian Academy of Sciences).

References

1. Golovkin M.A., Golovkina E.V. Vizualizacija struktur techenija v okrestnosti modelej letatel'nyh apparatov v gidrodinamicheskoj trube malyh skorostej (samoletnye ajerodinamicheskie komponovki) [Visualization of the flow structure in the vicinity of aircraft models in a low-speed hydrodynamic tube (airplane aerodynamic layouts)]. Trudy MAI [Proceedings of MAI], 2016, Issue no. 90, pp. 1-17.
2. Knyaz V.A., Stepaniants D.G., Ippolitov E.V., Novikov M.M. Optical 3d measurements in hydrodynamic tunnel for aircraft icing study. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2020, XLIII-B2-2020, pp.963-968.
3. Shortis M. Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems. Sensors, 2015, 15(12), pp. 30810-30826.
4. Drap P., Merad D., Hijazi B., Gaoua L., Nawaf M.M., Saccone M., Chemisky B., Seinturier J., Sourisseau J.-C., Gambin T., Castro F. Underwater photogrammetry and object modeling: A case study of xlendi wreck in malta, Sensors, 2015, 15(12), pp.30351-30384.
5. Nocerino E., Menna F. Photogrammetry: Linking the world across the water surface. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(128), pp.2-36.
6. Vo M.N., Wang Z., Luu L., Ma J. Advanced geometric camera calibration for machine vision. Optical Engineering, 2011, 50(11), pp.1-4.
7. Sedlazeck A., Koch R. Perspective and non-perspective camera models in underwater imaging –overview and error analysis. Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 212-242
8. Murase T., Tanaka M., Tani T., Miyashita Y., Ohkawa N., Ishiguro S., Suzuki Y., Kayanne H., Yamano H. A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2008, 74(9), pp.1129-1136.
9. Gonzarlez-Vera A.S., Wilting T.J.S., Holten A.P.C., van Heijst G.J.F., Duran-Matute M. High-resolution single-camera photogrammetry: incorporation of refraction at a fluid interface. Exp Fluids, 2020, 61(1), pp. 1-19.
10. Skarlatos D., Agrafiotis P. A novel iterative water refraction correction algorithm for use in structure from motion photogrammetric pipeline. Journal of Marine Science and Engineering, 2018, 6(3).

11. Menna F., Nocerino E., Fassi F., Remondino F. Geometric and optic characterization of a hemispherical dome port for underwater photogrammetry. *Sensors*, 2016, 16(1).
12. Chadebecq F., Vasconcelos F., Lacher R., Maneas E., Desjardins A., Ourselin S., Vercauteren T., Stoyanov D. Refractive two-view reconstruction for underwater 3d vision. *International Journal of Computer Vision*, 2019.
13. Telem G., Filin S. Photogrammetric modeling of underwater environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(5), pp. 433-444.
14. Braeuer-Burchardt C., Kuehnmstedt P., Notni G. Combination of air- and water-calibration for a fringe projection based underwater 3d-scanner. *Computer analysis of images and patterns*, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp.49-60.
15. Agrafiotis P., Karantzalos K., Georgopoulos A., Skarlatos D. Correcting image refraction: Towards accurate aerial image-based bathymetry mapping in shallow waters. *Remote Sensing*, 2020, 12(2).
16. Brown D. Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering*, 1966, 32(3), pp. 444-462.
17. Beyer H. Advances in characterization and calibration of digital imaging systems. *Int. arch. photogramm. Remote sens. Spatial inf. sci.*, 1992, XXIX, pp.545-555.
18. Knyaz V.A. Scalable photogrammetric motion capture system "mosca": Development and application. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 2015, XL-5/W6, pp.43-49.
19. Knyaz V.A., Zheltov S.Y., Vishnyakov B.V. Robust object tracking techniques for vision-based 3D motion analysis applications. *Optics, photonics and digital technologies for imaging applications IV*, International society for optics and photonics SPIE, 2016, 9896, pp. 334-342.
20. Knyaz, V.A., Stepanyants D.G., Tsareva O.Yu. Kalibrovka opticheskoy sistemy dlya trokhmernykh izmereniy v gidrodinamicheskoy trube [Calibration of an optical system for three-dimensional measurements in a hydrodynamic tube]. *Komp'yuternaya optika [Computer Optics]*, 2021, vol.45, no. 1, pp. 58-65.
21. Kniaz V.V., Grodzitskiy L., Knyaz V.A. Deep learning for coded target detection. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 2021, XLIV-2/W1-2021, pp. 125-130.
22. Knyaz V., Zheltov S. Accuracy evaluation of structure from motion surface 3D reconstruction. *Videometrics, range imaging, and applications XIV*, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2017, 10332, pp. 200-209.

Mikhail Mikhailovich Novikov. Senior Research Fellow, Institute for Problems of Laser and Information Technologies RAS - branch of the Federal State Institution Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS, SPIN: 3713-0429, AuthorID: 38807, ORCID: 0000-0003-0626-793X, novikov@rambler.ru, 140700, Russia, Shatura, Moscow region, Svyatoozerskaya st., 1.

Evgeny Viktorovich Ippolitov. Research Fellow, Institute for Problems of Laser and Information Technologies RAS - branch of the Federal State Institution Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS, SPIN: 3694-9798, AuthorID: 1043880, ORCID: 0000-0002-0622-6727, ippevg@ya.ru, 140700, Russia, Shatura, Moscow region, Svyatoozerskaya st., 1.

Sergey Valentinovich Kamaev. Senior Research Fellow, Institute for Problems of Laser and Information Technologies RAS - branch of the Federal State Institution Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS, SPIN: 1473-2930, AuthorID: 38809, ORCID: 0000-0001-7423-1264, ksv6@rambler.ru, 140700, Russia, Shatura, Moscow Region, Svyatoozerskaya st., 1.

Mikhail Alexandrovich Markov. Senior Research Fellow, Institute for Problems of Laser and Information Technologies RAS - branch of the Federal State Institution Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS, AuthorID: 3713-0429, ORCID: 0000-0003-1054-2615, markov@shatura.laser.ru, 140700, Russia, Shatura, Moscow Region, Svyatoozerskaya st., 1.

Vladimir Alexandrovich Knyaz. Head of Department, Candidate of Technical Sciences Federal State Unitary Enterprise "GosNII of Aviation Systems", SPIN: 8014-4229, AuthorID: 120975, ORCID: 0000-0002-4466-244, knyaz@gosniias.ru, 125319, Russia, Moscow, st. Viktorenko, d. 7.

Dmitry Georgievich Stepanyants. Candidate of Technical Sciences, Head of Sector at the Federal State Unitary Enterprise "GosNII of Aviation Systems", SPIN: 4539-8453, AuthorID: 443238, robin8081@gmail.com, 125319, Russia, Moscow, st. Viktorenko, d. 7.

Статья поступила в редакцию 13.07.2022; одобрена после рецензирования 03.10.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 07/13/2022; approved after reviewing 10/03/2022; accepted for publication 11/25/2022.