

## Раздел II. Радиотехника, телекоммуникации

УДК 621.397.13

С.Л. Балабаев, Е.Г. Лозовская

### ВЫБОР ПОЛОЖЕНИЙ ВИДЕОКАМЕРЫ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТ ГОЛОВОК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ\*

Исследуется система бесконтактного измерения разновысотности ТВС с помощью одной видеокамеры на ПЗС-матрице. Расстояние между центрами тяжести верхних поверхностей любых соседних головок тепловыделяющей сборки (ТВС) равно 234 мм. Алгоритм измерения высот головок ТВС предусматривает перемещение видеокамеры по окружности радиусом 3 м, формируя изображения с шести ракурсов. Высота подвеса видеокамеры 2,6 м обеспечивает одновременное наблюдение ячейки из 7 ТВС. Оптические оси видеокамеры проходят через центр тяжести ячейки. Предполагается использование видеокамеры CDR 3223 Vaxall с фокусным расстоянием объектива 24 мм и пиксельным разрешением ПЗС-матрицы 800×600. При измерении высоты всех головок ТВС приняты равными 3 мм. Используемая математическая модель регистрирующей видеокамеры в среде MathCAD и реализующее её программное обеспечение позволяет фиксировать дискретные координаты пикселей, в которых находятся центры тяжести верхних поверхностей ТВС. Причём фиксируются по 30 дискретных координат пикселей для семи центров тяжести верхних поверхностей ТВС в зависимости от комбинации двух положений видеокамеры. Всего же при круговом обзоре элементарной ячейки формируется 210 координат для каждого центра тяжести верхних поверхностей ТВС. Подробно проанализированы три стереопары изображений, полученных как комбинации измерений с 4-х положений видеокамеры: в двух последовательных (соседних) ракурсах, через один ракурс и со встречно направленных ракурсов. Определены достижимые минимальные погрешности измерения высоты, а также определены положения видеокамеры, с которых целесообразно снимать результаты измерений. Минимальная погрешность измерения высот ТВС (71 мкм, 2,4 %) обеспечивается со встречно направленных ракурсов видеокамеры для точек, не расположенных на оси стереопары (при максимальной стереобазе 6 м). За результат следует брать значение высоты, измеренное видеокамерой в положении, наименее удалённом от точки наблюдения. Доказано, что для максимальной точности измерений высот головок тепловыделяющей сборки можно ограничиться изменениями в положениях видеокамеры со встречно направленными ракурсами.

Тепловыделяющая сборка; разновысотность; бесконтактный метод измерения; видеокамера на ПЗС-матрице; реконструкция трехмерной сцены; методическая погрешность.

S.L. Balabaev, E.G. Lozovskaya

### THE CHOICE OF CAMERA POSITION TO MINIMIZE THE MEASUREMENT ERROR OF THE FUEL ASSEMBLY HEAD

The non-contact the height's measurement system of the fuel assembly heads with a single CCD camera is investigated. The distance between the centers of gravity of the upper surfaces of any adjacent heads of the fuel assembly (FA) is equal to 234 mm. The algorithm the heights' measurements of the fuel assembly heads includes the moving of the camera around the circumference of a 3 m radius, forming the picture from six positions. The suspension's height of video camera is 2.6 m provides the simultane-

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-08-00071-а).

ous observation of the seven of the fuel assembly heads. The optical axis of the video camera passes through the center of gravity of the cell. It is supposed to use the camera CDR 3223 Baxall with the 24 mm lens focal length and the pixel resolution of CCD 800×600. The heights of the fuel assembly heads are assumed to be 3 mm. The mathematical model of the recording camcorder used in the medium MathCAD and its software let to capture discrete pixel coordinates in which the gravity centers of the fuel assemblies' upper surfaces are. And 30 discrete pixel coordinates for the seven gravity centers of the fuel assembly's upper surfaces, depending on the combination of two video camera positions are fixed. In total, by all-round visibility of the unit cell 210 coordinates for the gravity center of each of the fuel assemblies' upper surfaces are formed. Three stereo pairs of images are analyzed in detail, as a combination of measurements obtained from 4 camera positions: from two consecutive (adjacent) angles, from positions in one angle and from oppositely directed angles. The achievable minimum height measurement errors are identified and defined, from which it is advisable to take the measurements. The minimum height measurement error of the fuel assembly heads (71 m, 2.4%) is provided from the oppositely directed angles of video camera for points, not located on the axis of a stereo pair (the stereo base is maximum 6 meters). The height, measured in the video camera position in the least distance from the observation point, should be taken instead of the result. It is proved that for the maximum precision height measurement of the fuel assembly heads we can limit the changes of the results of video camera angles from the opposite direction.

*The fuel assembly; the measurement of height; the non-contact measurement method; the CCD camera; the reconstruction of three-dimensional scene; the methodical error.*

**Предисловие.** Ядерная энергетика является одной из базовых отраслей, определяющих темпы развития промышленности и социальной сферы в Российской Федерации [1]. В связи с возросшими требованиями к обеспечению безопасности эксплуатации и эффективности работы атомных электростанций (АЭС) требуется повышение отказоустойчивости, безаварийности и эффективности работы оборудования как на эксплуатируемых, так и на вновь строящихся АЭС.

Планово-предупредительные мероприятия на АЭС с ядерными водяными энергетическими реакторами включают контроль разноразности головок ТВС, позволяющий зафиксировать критическое искривление их формы и гарантирующий безопасность эксплуатации активной зоны реактора.

Рабочим технологическим регламентом эксплуатации энергоблока предусмотрено бесконтактное измерение разноразности головок ТВС на основе обработки изображений телевизионной системой [2].

**Введение.** В [3] описан бесконтактный метод определения разноразности головок ТВС с помощью одной видеокамеры на видеоконе, которая последовательно формирует изображения с разных ракурсов. Исследуемые объекты расположены в строгом геометрическом порядке, образуя элементарные ячейки из семи ТВС. Причём центры тяжести верхних поверхностей шести ТВС находятся в вершинах, а центр поверхности седьмого ТВС – в геометрическом центре правильного шестиугольника. Исследуемые объекты располагаются в водной среде. Осветительное устройство закреплено на видеокамере, непосредственно освещая обследуемый фрагмент сцены. При точной установке (перемещении) видеокамеры в двух точках пространства формируется стереопара изображений.

Контроль разноразности цилиндрических объектов, описанный в [4], предусматривает определённую последовательность получения и обработки изображений, включающую проведение взаимного ориентирования (расположения) видеокамеры для получения серии изображений, оценку качества изображения по гистограмме распределения вероятностей яркости, удаление мелких элементов в изображениях, селекцию фрагментов изображения ТВС, выделение границ верхних поверхностей ТВС, аппроксимацию верхней поверхности ТВС эллипсом и, наконец, определение трёхмерных координат центров тяжести верхних поверхностей ТВС.

Для метода предложена математическая модель стереосистемы [5] и алгоритм обработки изображений [6], позволяющие определять трехмерные координаты центров тяжести верхних поверхностей семи ТВС для шести положений (ракурсов) видеокамеры на видиконе.

В описанных бесконтактных системах измерения разнорысотности головок ТВС возможность применения видеокамер на ПЗС-матрицах не оценивалась. В то же время известно, что ПЗС-матрицы, помимо меньших массогабаритных показателей по сравнению с видиконами, не требуют высокого напряжения питания и обеспечивают меньшую зашумность изображения на пиксель [7].

В подтверждение к сказанному заметим, что фирма «Диаконт» уже наладила производство телевизионной специальной системы СТС-ТТО-3 [8], предназначенной для контроля за транспортно-технологическими операциями. В состав системы входит телевизионная камера D20-017 на базе чёрно-белой ПЗС-матрицы.

Разработанная в [9] математическая модель позволяет рассчитать в естественных единицах ПЗС-матрицы дискретные координаты пикселей, в которых находятся центры тяжести верхних поверхностей ТВС. Используя принципы фотограмметрии, уже в глобальной системе координат (ГСК) сцены определяются координаты семи центров в элементарной ячейке ТВС для 15 стереопар изображений, полученных как комбинации 6 положений (ракурсов) видеокамеры. С учётом внутренних параметров и ракурсов видеокамеры получены выражения для оценки методической погрешности измерения разнорысотности и установления её связи с расстоянием между положениями (стереобазой) видеокамеры и удалённостью наблюдаемой сцены [10].

**Постановка задачи.** Исследуемый алгоритм измерения высот головок ТВС предусматривает перемещение оптического центра видеокамеры при обследовании ячейки по окружности радиусом  $R_{BK}$ , последовательно формируя изображения с шести ракурсов (в положениях ПБК1 ... ПБК6 на рис. 1 с нумерацией по часовой стрелке).

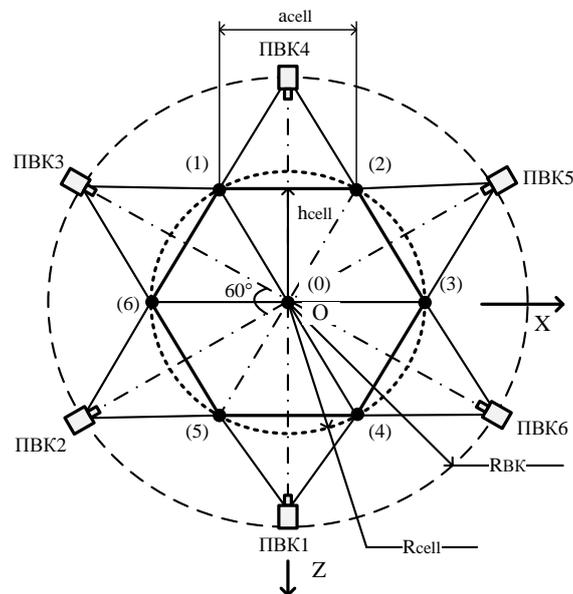


Рис. 1. Положения видеокамеры в процессе измерения высот головок ТВС

В идеализированной модели бесконтактного измерения разновысотности ТВС с помощью одной видеокамеры на ПЗС-матрице расстояние  $a_{\text{cell}}$  между центрами тяжести верхних поверхностей любых соседних головок ТВС фиксировано. Исследуемая ячейка представляет правильный шестиугольник.

Вершины шестиугольника (точки (1) ... (6) с нумерацией по часовой стрелке на рис. 1) являются центрами тяжести верхних поверхностей ТВС и расположены на окружности с фиксированным радиусом  $R_{\text{cell}}$ , причём  $R_{\text{cell}} = a_{\text{cell}}$ . Центр тяжести шестиугольника совпадает с центром тяжести верхней поверхности центрального ТВС (точка (0) на рис. 1).

Высота подвеса видеокамеры  $H_{\text{BK}}$  определяется исходя из наблюдения ячейки (всего шестиугольника). При этом оптические оси видеокамеры в каждом положении должны обязательно проходить через центр тяжести ячейки (точку (0) на рис. 1).

Разновысотность головок ТВС в глобальной системе координат ячейки OXYZ определяется разностью координат их высот по оси OY. Начало ГСК совпадает с центром тяжести шестиугольника (точка (0) на рис. 1). Ось OY ГСК перпендикулярна плоскости, образуемой положениями ПВК1 ... ПВК6 видеокамеры, совпадая с осью штанги. Ось OZ перпендикулярна одной из сторон шестиугольника (отрезок 4–5 на рис. 1).

Математическая модель регистрирующей видеокамеры, описанная в [11], позволяет фиксировать дискретные координаты пикселей (фотоэлементов в ПЗС-матрице), в которых находятся центры тяжести верхних поверхностей ТВС. Причём фиксируются по 30 дискретных координат пикселей для семи центров тяжести верхних поверхностей ТВС (точки (0) ... (6) на рис. 1) в зависимости от комбинации двух положений (ракурсов) видеокамеры. Например, для точки 1 на рис. 1 будут фиксироваться координаты пикселей для следующих 15-ти стереопар положений (ракурсов) видеокамеры:

ПВК1-ПВК2, ПВК1-ПВК3, ПВК1-ПВК4, ПВК1-ПВК5, ПВК1-ПВК6,  
 ПВК2-ПВК3, ПВК2-ПВК4, ПВК2-ПВК5, ПВК2-ПВК6,  
 ПВК3-ПВК4, ПВК3-ПВК5, ПВК3-ПВК6,  
 ПВК4-ПВК5, ПВК4-ПВК6,  
 ПВК5-ПВК6.

Всего же при круговом обзоре элементарной ячейки формируется 210 координат для каждого центра тяжести верхних поверхностей ТВС.

Причины столь большого объёма координат связаны с особенностью формирования стереопары изображений. В двух положениях (ракурсах) оси видеокамеры не параллельны не только друг другу, но и оси стереопары. Здесь под осью стереопары принимается виртуальная линия, перпендикулярная стереобазе и проходящая через её середину. В соответствии с принципами фотограмметрии пересчитанные локальные координаты в ГСК для правого и левого положений видеокамеры будут различны.

В этих условиях естественна постановка задачи о целесообразности и необходимости использования всего набора из 210 измеренных координат центров тяжести верхних поверхностей ТВС.

Цель исследований состоит в выборе положений видеокамеры на ПЗС-матрице для минимизации объёма измерений координат центров тяжести верхних поверхностей головок тепловыделяющей сборки при условии обеспечения максимальной точности измерений их высот.

**Параметры исследуемой системы и алгоритм контроля высоты головок ТВС.** В исследуемой системе бесконтактного измерения разновысотности ТВС с помощью одной видеокамеры на ПЗС-матрице расстояние между центрами тяжести верхних поверхностей любых соседних головок ТВС равно  $a_{\text{cell}}=234$  мм. По вертикали расстояние между рядами центров головок ТВС соответствует высоте  $h_{\text{cell}}=202,65$  мм равностороннего треугольника с длиной стороны  $a_{\text{cell}}=234$  мм (см. рис. 1).

Высота подвеса видеокамеры  $H_{\text{BK}}=2,6$  м при радиусе вращения видеокамеры  $R_{\text{BK}}=3$  м гарантирует наблюдение всей ячейки. При этом оптическая ось видеокамеры в любом положении проходит через центр тяжести шестиугольника точка (0). Угол наклона видеокамеры относительно оси OY равен  $\delta_{\text{BK}} = \arctan(R_{\text{BK}}/H_{\text{BK}}) = 49,1^\circ$ .

При измерении высот всех головок ТВС  $h_{\text{TBC}}$  принята равной 3 мм. Тогда начальные трехмерные координаты  $(X_{\text{BKk}}, Y_{\text{BKk}}, Z_{\text{BKk}})$  в миллиметрах центра и вершин правильного шестиугольника (точки (0) ... (6) на рис. 1) задаются матрицей в ГСК ячейки OXYZ с размерностью  $7 \times 3$

$$\|M\| = \|M_{ij}\|_{7,3} = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 0 \\ -117 & 3 & -203 \\ 117 & 3 & -203 \\ 234 & 3 & 0 \\ 117 & 3 & 203 \\ -117 & 3 & 203 \\ -234 & 3 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В формуле (1) индекс  $i$  показывает номер точки (0...6), а индекс  $j$  – соответствует её координатам по осям OX, OY и OZ.

Считается, что предварительно выполнена последовательность операций [13], включающая:

расположение видеокамеры строго в заданных точках пространства для получения серии изображений;

оценку качества изображения по гистограмме распределения вероятностей яркости;

удаление второстепенных деталей в изображениях;

выделение границ верхних поверхностей ТВС;

аппроксимацию верхней поверхности ТВС эллипсом;

определение координат центров тяжести верхних поверхностей головок ТВС в изображениях стереопары в ССК видеокамеры.

Предполагается использование видеокамеры CDR 3223 Vaxall с фокусным расстоянием объектива  $f_{\text{об}}=24$  мм и пиксельным разрешением ПЗС-матрицы  $N_{\text{ПЗС1}} \times N_{\text{ПЗС2}}=800 \times 600$ . При размере фоточувствительной поверхности  $I_{\text{ПЗС1}} \times I_{\text{ПЗС2}}=7,2 \times 5,3$  мм размер одного пикселя равен  $9 \times 8,8$  мкм.

В стандартной системе координатами проекций точек трехмерного пространства являются непрерывные координаты  $(x_{\text{BKk}}, y_{\text{BKk}})$  в плоскости фоточувствительной поверхности ПЗС-матрицы, причём

$$x_{ВКk} = f_{об} \frac{X_{ВКk}}{Z_{ВКk}}; \quad y_{ВКk} = f_{об} \frac{Y_{ВКk}}{Z_{ВКk}}; \quad k = \overline{1, 6}. \quad (2)$$

Результаты расчётов по формулам (1)–(2) координат проекций вершин шестиугольника в плоскости ПЗС-матрицы при получении изображения с k-го положения при использовании видеокамеры CDR-3223 Вахалл сведены в табл. 1.

Поскольку в исследуемой системе в качестве преобразователя оптического изображения в электрические сигналы используется ПЗС-матрица, то для описания изображения видеокамеры необходимо выразить координаты точек двумерной непрерывной системы  $(x_{ВКk}, y_{ВКk})$  в плоскости фоточувствительной поверхности в координатах точек двумерной дискретной системы  $(u_{ВКk}, v_{ВКk})$  матричного фотоприемника.

Пусть  $u_0=0$  и  $v_0=0$  – дискретные координаты точки (0) относительно начала координат в номерах между ячейками ПЗС-матрицы вдоль строк и столбцов (осей  $ox$  и  $oy$ ). Тогда

$$u_{ВКk} = \left\lfloor \frac{x_{ВКk}}{K_{ox}} \right\rfloor; \quad v_{ВКk} = \left\lfloor \frac{y_{ВКk}}{K_{oy}} \right\rfloor; \quad k = \overline{1, 6}. \quad (3)$$

где  $K_{ox} = 9$  мкм/пкс и  $K_{oy} = 8,8$  мкм/пкс – масштабные коэффициенты для расстояний между ячейками матричного фотоприемника вдоль строк и столбцов (осей  $ox$  и  $oy$ ).

Таблица 1

**Координаты проекций вершин шестиугольника в плоскости ПЗС-матрицы при получении изображения с k-го ракурса, мкм**

Номер точки	Положение ПВК1		Положение ПВК2	
	$x_{ВК1}$	$y_{ВК1}$	$x_{ВК2}$	$y_{ВК2}$
1	0	0,0137	0	0,0137
2	0,6814	0,7861	1,415	0,0137
3	минус 0,6814	0,7861	0,6814	0,7861
4	минус 1,4150	0,0137	минус 0,6814	0,7861
5	минус 0,7361	минус 0,8207	минус 1,4150	0,0137
6	0,7361	минус 0,8207	минус 0,7361	минус 0,8207

Номер точки	Положение ПВК3		Положение ПВК4	
	$x_{ВК3}$	$y_{ВК3}$	$x_{ВК4}$	$y_{ВК4}$
1	0	0,0137	0	0,0137
2	0,7361	минус 0,8207	минус 0,7361	минус 0,8207
3	1,4150	0,0137	0,7361	минус 0,8207
4	0,6814	0,7861	1,4150	0,0137
5	минус 0,68144	0,78614	0,6814	0,7861
6	минус 1,4150	0,0137	минус 0,68144	0,78614

Данные табл. 1 совместно с преобразованиями (3) позволяют определять номера пикселей, в которых находятся центры тяжести верхних поверхностей головок ТВС. В табл. 2 сведены результаты расчётов при задании диапазона изменений дискретных величин  $u_{ВКk} = -400, 400$  и  $v_{ВКk} = -300, 300$ .

В [11] показано, что для формирования информации о трехмерной сцене могут использоваться 15 стереопар изображений (СИ), полученных как комбинации изображений в шести положениях (ракурсах) видеокамеры. С теоретической точки зрения интерес представляют только три стереопары изображений, полученных как комбинации измерений с 4-х положений видеокамеры (ПВК1...ПВК4 на рис. 1):

- ◆ стереопара изображений СИ1 формируется из положений ВК в двух последовательных (соседних) ракурсах (ПВК1–ПВК2);
- ◆ стереопара изображений СИ2 формируется из положений ВК через один ракурс (ПВК1–ПВК3);
- ◆ стереопара изображений СИ3 формируется из положений ВК со встречно направленными ракурсами (ПВК1–ПВК4).

Таблица 2

Номера пикселей с центрами тяжести верхних поверхностей головок ТВС

Номер точки	Положение ВК1		Положение ВК2	
	$u_{ВК1}$	$v_{ВК1}$	$u_{ВК2}$	$v_{ВК2}$
1	0	2	0	2
2	76	89	158	2
3	минус 76	89	76	89
4	минус 158	2	минус 76	89
5	минус 82	минус 93	минус 158	2
6	82	минус 93	минус 82	минус 93

Номер точки	Положение ВК3		Положение ВК4	
	$u_{ВК3}$	$v_{ВК3}$	$u_{ВК4}$	$v_{ВК4}$
1	0	2	0	2
2	82	минус 93	минус 82	минус 93
3	158	2	82	минус 93
4	76	89	158	2
5	минус 76	89	76	89
6	минус 158	2	минус 76	89

Векторы трехмерных координат точек в 4-х положениях видеокамеры ПВК1 ... ПВК4 могут быть вычислены по формуле

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{v}_1^T \cdot A_1^{-T} \cdot A_1^{-1} \cdot \vec{v}_1 & -\vec{v}_1^T \cdot A_1^{-T} \cdot R^T \cdot A_2^{-1} \cdot \vec{v}_1 \\ \vec{v}_1^T \cdot A_1^{-T} \cdot R^T \cdot A_2^{-1} \cdot \vec{v}_2 & \vec{v}_2^T \cdot A_2^{-T} \cdot A_2^{-1} \cdot \vec{v}_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \vec{v}_1^T \cdot A_1^{-T} \cdot R^T \\ \vec{v}_2^T \cdot A_2^{-T} \end{bmatrix} \cdot |t|, \quad (4)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – координаты оси аппликат одной вершины ячейки для двух рассматриваемых положений видеокамеры;

$|t|$  – матрица трансляции, определяющая положение оптического центра второго положения видеокамеры в системе координат первого;

$\vec{v}_1, \vec{v}_2$  – векторы однородных внутренних координат первого и второго положений видеокамеры;

$A_1, A_2$  – матрицы внутренних параметров положений видеокамеры, содержащие параметры оптической системы и фотоприемника видеокамеры.

Выражение (4) позволяет вычислить трехмерные координаты вектора  $\vec{M}_{\text{ВКк-СИс}}$  для k-го положения видеокамеры ( $k = \overline{1, 4}$ ) по стереопаре изображений СИс ( $s = \overline{1, 3}$ ).

Например, трехмерные координаты векторов рассчитываются по формулам:

$$\vec{M}_{\text{ВК1-СИ1}} = Z_1 \cdot A_1^{-1} \cdot \vec{v}_1; \quad \vec{M}_{\text{ВК2-СИ1}} = Z_2 \cdot A_2^{-1} \cdot \vec{v}_2 \quad (5)$$

для первого (ПВК1) и второго (ПВК2) положений видеокамеры (двух последовательных ракурсов) по стереопаре изображений СИ1;

$$\vec{M}_{\text{ВК1-СИ2}} = Z_1 \cdot A_1^{-1} \cdot \vec{v}_1; \quad \vec{M}_{\text{ВК3-СИ2}} = Z_3 \cdot A_3^{-1} \cdot \vec{v}_3 \quad (6)$$

для первого (ПВК1) и третьего (ПВК3) положений видеокамеры (через один ракурс) по стереопаре изображений СИ2 и, наконец,

$$\vec{M}_{\text{ВК1-СИ3}} = Z_1 \cdot A_1^{-1} \cdot \vec{v}_1; \quad \vec{M}_{\text{ВК4-СИ3}} = Z_4 \cdot A_4^{-1} \cdot \vec{v}_4. \quad (7)$$

для первого (ПВК1) и четвертого (ПВК4) положений видеокамеры (со встречно направленных ракурсов) по стереопаре изображений СИ3.

В табл. 3 представлены результаты пересчёта по формулам (4)–(7) координат вершин ячейки из двумерной дискретной системы матричного фотоприёмника в стандартную систему координат (ССК) видеокамеры в k-м положении ПВКк ( $k = \overline{1, 4}$ ), по стереопаре изображений СИс ( $s = \overline{1, 3}$ ).

Таблица 3

**Результаты пересчёта координат центра и вершин ячейки в ССК видеокамеры, мм**

Номер точки	ВК1–СИ1			ВК2–СИ1		
	$x_{\text{ВК1-СИ1}}$	$y_{\text{ВК1-СИ1}}$	$z_{\text{ВК1-СИ1}}$	$x_{\text{ВК2-СИ1}}$	$y_{\text{ВК2-СИ1}}$	$z_{\text{ВК2-СИ1}}$
1	0	2,92	3967	0	2,92	3967
2	117	135	4122	235	2,92	3968
3	минус 117	135	4122	117	135	4122
4	минус 235	2,92	3968	минус 117	135	4122
5	минус 117	минус 131	3813	минус 235	2,92	3967
6	117	минус 131	3814	минус 117	минус 131	3814

Номер точки	ВК1–СИ2			ВК3–СИ2		
	$x_{\text{ВК1-СИ2}}$	$y_{\text{ВК1-СИ2}}$	$z_{\text{ВК1-СИ2}}$	$x_{\text{ВК3-СИ2}}$	$y_{\text{ВК3-СИ2}}$	$z_{\text{ВК3-СИ2}}$
1	0	2,92	3967	0	2,92	3967
2	117	135	4121	117	минус 131	3815
3	минус 117	135	4121	235	2,92	3968
4	минус 235	2,92	3968	117	135	4121
5	минус 117	минус 131	3815	минус 117	135	4121
6	117	минус 131	3814	минус 235	2,92	3968

Номер точки	ВК1–СИЗ			ВК4–СИЗ		
	$x_{ВК1-СИЗ}$	$y_{ВК1-СИЗ}$	$z_{ВК1-СИЗ}$	$x_{ВК4-СИЗ}$	$y_{ВК4-СИЗ}$	$z_{ВК4-СИЗ}$
1	0	2,92	3967	0	2,92	3967
2	117	135	4121	минус 117	минус 131	3815
3	минус 117	135	4121	117	минус 131	3815
4	минус 235	2,92	3967	235	2,92	3967
5	минус 117	минус 131	3815	117	135	4121
6	117	минус 131	3815	минус 117	135	4121

С помощью разработанной математической модели регистрирующей видеокамеры на ПЗС-матрице производится обратный пересчёт координат из ССК видеокамеры в глобальную систему координат наблюдаемой ячейки. С учётом внутренних параметров и ракурсов видеокамеры рассчитываются координаты центров тяжести верхней поверхности ТВС по стереопаре изображений и оценивается методическая погрешность измерения высот ТВС.

Заметим, что результаты анализа выбранных трёх стереопар изображений легко могут быть распространены и на остальные стереопары изображений.

**Измерение высот ТВС по стереопаре изображений видеокамеры в двух соседних положениях ПВК1 – ПВК2.** В анализируемом случае размер стереобазы 3 м, представляющей отрезок прямой между оптическими центрами видеокамеры в положениях ПВК1 и ПВК2, равен радиусу вращения видеокамеры (рис. 2). Действительно, в ГСК ХОZ угол между оптическими осями видеокамеры в положениях ПВК1 и ПВК2 равен  $60^\circ$ . При этом треугольник ПВК1–О–ПВК2, образованный стереобазой и оптическими осями видеокамеры в положениях ПВК1 и ПВК2, является равносторонним.

Ось стереопары проходит через центры тяжести верхних поверхностей трёх головок ТВС (точки (5), (0) и (2) на рис. 2).

Результаты измерения абсолютной погрешности высот головок ТВС видеокамерой на ПЗС-матрице в положениях ПВК1 и ПВК2 (с двух ракурсов) сведены в табл. 4.

Таблица 4

**Абсолютная погрешность измерения высот головок ТВС по стереопаре изображений видеокамеры в положениях ПВК1 и ПВК2, мкм**

Положение видеокамеры	Номер ТВС (центра тяжести верхних поверхностей ТВС)						
	0	1	2	3	4	5	6
ПВК1	минус 865	442	669	минус 386	минус 902	минус 295	минус 1051
ПВК2	минус 865	минус 386	669	442	минус 1051	минус 295	минус 902

Из таблицы видно, что точки (5), (0) и (2) на оси стереопары имеют одинаковые абсолютные погрешности измерения высоты ТВС как с положения видеокамеры в ПВК1, так и в ПВК2. Для точки (5) погрешность равна минус 295 мкм, для точки (0) – минус 865 мкм, а для точки (2) – 669 мкм.

Точки (4) и (6) расположены симметрично относительно оси стереопары и на одинаковом удалении от неё. Однако пересчитанные координаты этих точек в глобальную систему координат ячейки различны, поскольку находятся на разном удалении от положения видеокамеры (рис. 3).

Действительно, удаление точки (6) от положения ПВК2 3,819 м равно расстоянию от положения ПВК1 до точки (4). Аналогично, удаление точки (4) от положения ПВК2 3,975 м равно удалению точки (6) от положения ПВК1. Однако расстояние до точки (6) от положения ПВК2 3,819 м не равно расстоянию от положения ПВК1 3,975 м. Аналогично фиксируется отличие расстояний до точки (6) 3,975 м и 3,819 м соответственно от положений видеокамеры ПВК1 и ПВК2.

Отличие в результатах измерений высот расположения точек (4) и (6) составляет 149 мкм. За основу целесообразно брать измерения высот от ближайшей к точке видеокамеры: для точки (6) – это положение ПВК2, а для точки (4) – ПВК1.

Этот же вывод подтверждает и результаты измерений высот точек (1) и (3). Точка (1) ближе расположена к положению видеокамеры ПВК2 (3,975 м), чем к ПВК1 (4,125 м). Как следствие, высота, пересчитанная в системе координат видеокамеры в положении ПВК2, будет иметь меньшую погрешность: минус 386 мкм для положения ПВК2 и 442 мкм для ПВК1.

Напротив, точка (3) ближе к ПВК1 (3,975 м), чем к ПВК2 (4,125 м). Поэтому погрешность меньше для ПВК1 (минус 386 мкм), чем для ПВК2 (442 мкм). Поскольку расстояния от положений ПВК1 и ПВК2 до точек (1) и (3) в рассматриваемом случае отличаются менее заметно, чем до точек (4) и (6), то и погрешность в ГСК ПВК1 и ПВК2 будет различаться между собой меньше. Это подтверждают данные таблицы, из которой следует, что здесь отличие составляет всего 56 мкм.

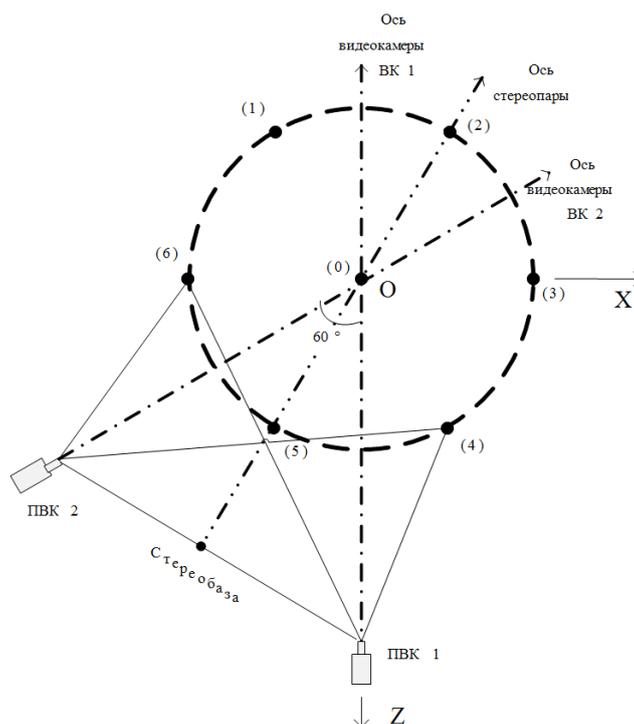


Рис. 2. Измерение высот ТВС по стереопаре изображений видеокамеры в двух соседних положениях ПВК1–ПВК2

От положений видеокамеры ПВК1 и ПВК2 точки (5), (0) и (2) находятся на равных расстояниях (соответственно 3,819; 3,968 и 4,125 м). Поэтому для точек (5), (0) и (2) на оси стереопары можно использовать результаты измерений в ГСК видеокамеры в любом из двух положений.

Для точек, не расположенных на оси стереопары, за основу будут приниматься результаты измерений высоты в ГСК видеокамеры в наиболее близком положении.

Заметим, что при расстоянии не менее 4 м от положения видеокамеры до точки погрешность измерения положительна.

В табл. 5 сведены достижимые минимальные погрешности измерения высоты, а также определены положения видеокамеры, с которых целесообразно снимать результаты измерений.

Таблица 5

**Выбор положений видеокамеры для обеспечения наименьшей погрешности измерения высот ТВС по стереопаре изображений в двух соседних положениях ПВК1 – ПВК2**

Параметр	Номер ТВС (точки)						
	0	1	2	3	4	5	6
Положение видеокамеры	ПВК1, ПВК2	ПВК2	ПВК1, ПВК2	ПВК1	ПВК1	ПВК1, ПВК2	ПВК2
Погрешность, мкм	минус 865	минус 386	669	минус 386	минус 902	минус 295	минус 902

Видно, что относительная погрешность достигает 30 % при измерении высот ТВС под номерами 4 и 6. Минимальная относительная погрешность в 10 % обеспечивается для ТВС под номером 5, наименее удалённого от положений ПВК1 и ПВК2 видеокамеры.

**Измерение высот ТВС по стереопаре изображений видеокамеры из положений ПВК1 – ПВК3.** В анализируемом случае угол между оптическими осями видеокамер составляет  $120^\circ$  (рис. 3). Размер стереобазы между положениями ПВК1-ПВК3 равен  $3\sqrt{3}$  м, что в 1,7 раза превышает размер стереобазы в предшествующем случае.

Результаты измерения абсолютной погрешности измерения высот головок ТВС видеокамерой в положениях ПВК1 и ПВК3 (с двух ракурсов) сведены в табл. 6.

Таблица 6

**Абсолютная погрешность измерения высот головок ТВС по стереопаре изображений видеокамеры в положениях ПВК1 и ПВК3, мкм**

Положение видеокамеры	Номера ТВС						
	0	1	2	3	4	5	6
ПВК1	минус 865	147	203	минус 300	минус 95	минус 745	минус 689
ПВК3	минус 865	минус 95	минус 300	203	147	минус 689	минус 745

Поскольку только точка (0) расположена на оси стереобазы и одинакова удалена от видеокамеры в положениях ПВК1 и ПВК3 (3,968 м), то только для этой точки совпадают погрешности измерения высоты объектов в обоих положениях (минус 865 мкм).

Удаление (4,125 м) от точки (1) видеокамеры в положении ПВК1 равно удалению от точки (4) в положении ПВК3 (табл. 7). Как следствие, для видеокамеры в положении ПВК1 погрешность измерения (плюс 147 мкм) точки (1) равна погрешности точки (4) в положении ПВК3. Аналогично, точки (1) и (4) равноудалены (4,125 м) от видеокамеры в положениях ПВК1 и ПВК3. Поэтому для видеокамеры в положении ПВК3 погрешность (минус 95 мкм) точки (1) равна погрешности точки (4) в положении ПВК1.

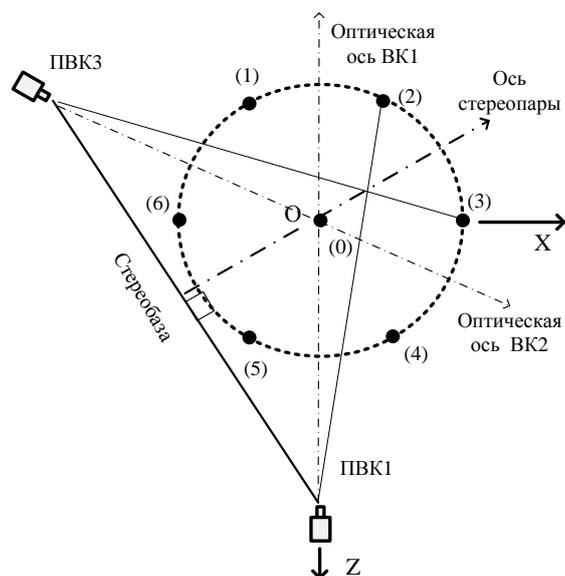


Рис. 3. Измерение высот объектов по стереопаре изображений видеокамеры в положениях ПКВ1–ПКВ3

Таблица 7

Удалённость центров тяжести верхних поверхностей ТВС от видеокамеры в положениях ПКВ1 и ПКВ3, м

Положение видеокамеры	Номера ТВС						
	0	1	2	3	4	5	6
ПКВ1	3,968	4,125	4,125	3,975	3,819	3,819	3,975
ПКВ3	3,968	3,819	3,975	4,125	4,125	3,975	3,819

Этими же причинами объясняется погрешность измерения в точках (2) и (3), (5) и (6).

Здесь, как и в предшествующем случае, при расстоянии не менее 4 м от положения видеокамеры до точки погрешность измерения положительна.

В табл. 8 сведены достижимые минимальные погрешности измерения высоты, а также определены положения видеокамеры, с которых целесообразно снимать результаты измерений.

Таблица 8

Выбор положений видеокамеры для обеспечения наименьшей погрешности измерения высот ТВС по стереопаре изображений в положениях ПКВ1–ПКВ3

Параметр	Номер ТВС (точки)						
	0	1	2	3	4	5	6
Положение видеокамеры	ПКВ1, ПКВ3	ПКВ3	ПКВ1	ПКВ3	ПКВ1	ПКВ3	ПКВ1
Погрешность, мкм	минус 865	минус 95	203	203	минус 95	минус 689	минус 689

Видно, что относительная погрешность достигает 30 % при измерении высоты центра ячейки. Минимальная относительная погрешность в 3,2 % обеспечивается для ТВС под номерами 1 и 4, наименее удалённых (3,819 м) соответственно от положений видеокамеры ПКВ3 и ПКВ1.

**Измерение высот ТВС по стереопаре изображений видеокамеры из положений ПVK1-ПVK4 с максимальной базой стереосистемы.** В анализируемом случае (рис. 4) угол между оптическими осями видеокамер стереопары равен  $180^\circ$ , т. е. оси видеокамер направлены друг на друга. Размер стереобазы здесь максимален и равен  $2R_{BK} = 6$  м. Это в 2 раза больше, чем в первом случае и в 1,2 раза больше, чем во втором.

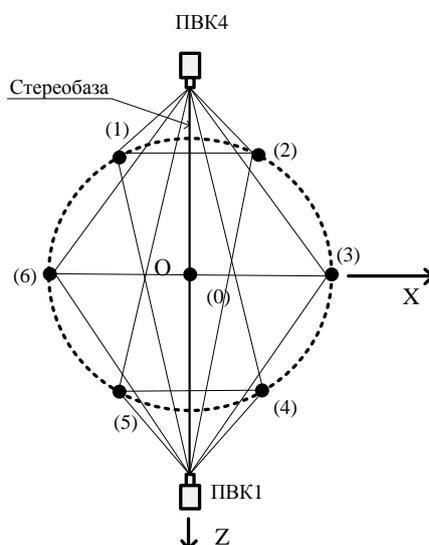
Результаты измерения абсолютной погрешности высот головок ТВС видеокамерой на ПЗС-матрице в положениях ПVK1 и ПVK4 сведены в табл. 9.

Таблица 9

**Абсолютная погрешность измерения высот головок ТВС по стереопаре изображений видеокамеры в положениях ПVK1 и ПVK4, мкм**

Положение видеокамеры	Номер ТВС (точки)						
	0	1	2	3	4	5	6
ПVK1	минус 865	71	71	минус 0,865	78	78	минус 865
ПVK4	минус 865	78	78	минус 865	71	71	минус 865

Поскольку точки (0), (3) и (6) располагаются на оси стереопары, то за основу могут приниматься измерения видеокамеры в любом положении. Кроме того, эти точки равноудалены от видеокамер в положениях ПVK1 и ПVK4. Точка (0) удалена на 3,968 м, а точки (3) и (6) – на 3,975 м. Поскольку разница в удалённости всего 7 см, то погрешности измерения высот точек (0), (3) и (6) одинаковы и равны минус 865 мкм.



*Рис. 4. Измерение высот ТВС по стереопаре изображений видеокамеры в положениях ПVK1–ПVK4*

Точки (1) и (2) равноудалены от видеокамеры в положении ПVK4 (3,819 м). Причём на столько же удалены точки (4) и (5) от видеокамеры в положении ПVK1. Поэтому во всех этих случаях погрешности измерения высот одинаковы и равны 71 мкм.

Расстояние от видеокамеры в положении ПВК1 (ПВК4) до точек (1) и (2) (точек (4) и (5)) равно 4,125 м. Поэтому погрешность измерения высоты этих точек равна плюс 78 мкм.

Отметим, что погрешность измерения высот отрицательна только для точек (0), (3) и (6) на оси стереопары.

В таблицу 10 сведены достижимые минимальные погрешности измерения высоты, а также определены положения видеокамеры, с которых целесообразно снимать результаты измерений.

Таблица 10

**Выбор положений видеокамеры для обеспечения наименьшей погрешности измерения высот ТВС по стереопаре изображений в положениях ПВК1–ПВК4**

Параметр	Номер ТВС (точки)						
	0	1	2	3	4	5	6
Положение видеокамеры	ПВК1, ПВК4	ПВК4	ПВК4	ПВК1, ПВК4	ПВК1	ПВК1	ПВК1, ПВК4
Погрешность, мкм	минус 865	71	71	минус 865	71	71	минус 865

Видно, что относительная погрешность близка к 30 % при измерении высоты точек (0), (3) и (6) на оси стереопары. Минимальная относительная погрешность в 2,4 % обеспечивается для остальных точках в наиболее близких к ТВС положениях видеокамеры.

**Сравнительный анализ результатов измерения высот ТВС с 4-х положений видеокамеры ПВК1 ... ПВК4.** На основании обобщения данных табл. 5, 8 и 10 можно определить в каком положении видеокамеры и по какой стереопаре изображений обеспечивается минимальная погрешность измерения высот ТВС (табл. 11).

Таблица 11

**Выбор положений видеокамеры и стереопары изображений для обеспечения наименьшей погрешности измерения высот ТВС для трёх анализируемых случаев**

Номер точки	Абсолютная погрешность, мкм	Относительная погрешность, %	Положение видеокамеры	Стереопара изображений
0	минус 865	28,8	ПВК1, ПВК2, ПВК1, ПВК3, ПВК1, ПВК4	ПВК1-ПВК2, ПВК1-ПВК3, ПВК1-ПВК4
1	71	2,4	ПВК4	ПВК1-ПВК4
2	71	2,4	ПВК4	ПВК1-ПВК4
3	203	6,8	ПВК3	ПВК1-ПВК3
4	71	2,4	ПВК1	ПВК1-ПВК4
5	71	2,4	ПВК1	ПВК1-ПВК4
6	минус 689	23	ПВК1	ПВК1-ПВК3

Видно, что для трёх анализируемых случаев для точки (0) не критичен выбор положения видеокамеры и стереопары изображений. При любой комбинации погрешность измерения высот ТВС максимальна (865 мкм). С высокой погрешностью измеряются высоты точек (6) 689 мкм и (3) 203 мкм.

Минимальная относительная погрешность измерения высот ТВС обеспечивается для точек (1), (2), (4) и (5), когда стереопара изображений СИЗ формируется из положений видеокамеры со встречно направленных ракурсов (ПВК1–ПВК4). Причём за результат следует брать значение высоты, измеренное видеокамерой в положении, наименее удалённом от точки наблюдения.

**Обобщение результатов измерения высот ТВС на стереопары изображений в шести положениях видеокамеры.** Ранее показано, что минимальная погрешность измерения высот ТВС обеспечивается со встречно направленных ракурсов видеокамеры для точек, не расположенных на оси стереопары (при максимальной стереобазе 6 м). Следовательно, минимальная погрешность измерения высот ТВС (71 мкм, 2,4 %) может быть обеспечена по стереопаре изображений видеокамеры из положений:

ПВК1-ПВК4 для точек (1), (2), (4) и (5);

ПВК2-ПВК5 для точек (2), (3), (5) и (6);

ПВК3-ПВК6 для точек (1), (3), (4) и (6).

За результат следует брать значение высоты, измеренное видеокамерой в положении, наименее удалённом от точки наблюдения.

**Заключение.** Исследован алгоритм измерения высот головок ТВС, предусматривающий перемещение видеокамеры по окружности, формируя изображения с шести ракурсов. Высота подвеса видеокамеры обеспечивает одновременное наблюдение ячейки из 7 ТВС. При этом оптические оси видеокамеры в каждом положении проходят через центр тяжести.

Используемая математическая модель регистрирующей видеокамеры и реализующее её программное обеспечение позволяет фиксировать дискретные координаты пикселей, в которых находятся центры тяжести верхних поверхностей ТВС. Причём фиксируются по 30 дискретных координат пикселей для семи центров тяжести верхних поверхностей ТВС в зависимости от комбинации двух положений (ракурсов) видеокамеры. Всего же при круговом обзоре элементарной ячейки формируется 210 координат для каждого центра тяжести верхних поверхностей ТВС.

Подробно проанализированы три стереопары изображений, полученных как комбинации измерений с 4-х положений видеокамеры: в двух последовательных (соседних) ракурсах, через один ракурс и со встречно направленных ракурсов). Определены достижимые минимальные погрешности измерения высоты, а также определены положения видеокамеры, с которых целесообразно снимать результаты измерений.

Доказано, что минимальная погрешность измерения высот ТВС (71 мкм, 2,4 %) обеспечивается со встречно направленных ракурсов видеокамеры для точек, не расположенных на оси стереопары (при максимальной стереобазе 6 м). За результат следует брать значение высоты, измеренное видеокамерой в положении, наименее удалённом от точки наблюдения.

Следовательно, для максимальной точности измерений высот головок тепловыделяющей сборки можно ограничиться изменениями в положениях видеокамеры со встречно направленными ракурсами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергетика России: проблемы и перспективы. Труды научной сессии РАН: Общ. собрание РАН 19-21 декабря 2005. – М.: Наука, 2006.
2. *Макеев В.В., Поваров В.П., Коробкин В.В., Лебедев О.В.* Система бесконтактного определения разнвысотности головок тепловыделяющих сборок в активной зоне реактора // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – № 16. – С. 37-41.
3. *Каляев И.А., Коробкин В.В., Кухаренко А.П., Макеев В.В., Поваров В.П., Румянцев К.Е.* Инновационные разработки Южного научного центра РАН в области создания систем управления для атомной энергетики // Инновации. – 2006. – № 10. – С. 62-65.
4. *Каляев И.А., Румянцев К.Е., Макеев В.В., Балабаев С.Л., Коробкин В.В., Коровин Я.С., Кухаренко А.П., Радецкий В.Г.* Бесконтактный метод определения разнвысотности головок тепловыделяющих сборок атомного реактора на основе реконструкции трёхмерных изображений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 3 (80). – С. 126-131.

5. Балабаев С.Л., Радецкий В.Г., Румянцев К.Е. Телеметрический метод контроля разнвысотности цилиндрических объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. –2008. – № 3 (80). – С. 94-110.
6. Коробкин В.В., Коровин Я.С., Хисамутдинов М.В., Румянцев К.Е., Балабаев С.Л., Макеев В.В. Система бесконтактного определения разнвысотности головок тепловыделяющих сборок реактора. Патент на полезную модель РФ № 103963. 2011. Дата регистрации 22.12.2010.
7. Балабаев С.Л., Корнилова Т.А., Лозовская Е.Г., Румянцев К.Е. Стереоскопическая система контроля разнвысотности головок тепловыделяющих сборок атомного реактора // Проблемы управления и моделирования в сложных системах (ПУМСС-2014). Труды XVI Международной конференции (30 июня–3 июля 2014 г, Самара, Россия). – Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. – С. 673-677.
8. Система телевизионная специальная СТС-ПМ-100В. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИТЦЯ.463432.005 ТО 2000. Фирма «Диаконт», г. Санкт-Петербург.
9. Lozovskaya E., Balabaev S., Rumyantsev K. The mathematical model of the recording video camera for the height measurement of the regularly situated objects // Materiały X Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki – 2014». – Vol. 31. – Matematyka. Fizyka: Przemysł. Nauka i studia. – P. 27-34.
10. Балабаев С.Л., Лозовская Е.Г., Румянцев К.Е. Оценка методической погрешности измерения разнвысотности расположенных в строгом геометрическом порядке объектов на основе цифровой телевизионной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8 (157). – С. 227-241.
11. Балабаев С.Л., Лозовская Е.Г., Румянцев К.Е. Методика оценки погрешности измерения цифровой видеосистемой разнвысотности расположенных в строгом геометрическом порядке объектов // Физико-математические методы и информационные технологии в естествознании, технике и гуманитарных науках: Сборник материалов международного научного е-симпозиума. Россия, г. Москва, 27–28 декабря 2014 г. – Киров: МЦНИП, 2015. – С. 61-76.
12. ПНАЭ Г-1-011-97. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88/97). – М.: Госатомнадзор России, 1999. IEC 61513 «Nuclear power plants – Instrumentation and control for systems important to safety General requirements for systems». First edition 2001-03.
13. НП-026-01. Требования к управляющим системам, важным для безопасности атомных станций. – М., 2001. Ястребенецкий М.А., Васильченко В.Н., Виноградская С.В., Гольдрин В.М., Розен Ю.В., Спектор Л.И., Харченко В.С. Безопасность атомных станций. Информационные и управляющие системы / Под ред. М.А. Ястребенецкого. – Киев: Техника, 2004.
14. Комплект кассет ВВЭР-1000. Руководство по эксплуатации 0401.22.00.000 РЭ.
15. ТОб-АЭС. Техническое обоснование безопасности. – Волгодонск: Ростовская АЭС, 2000.
16. Устройство записи и хранения информации Руководство по эксплуатации ИТЦЯ.467617.001 РЭ.
17. Система телевизионная специальная СТС-ПМ-100В. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИТЦЯ.463432.005 ТО 2000. Фирма «Диаконт», г. С-Петербург.
18. Лозовская Е. Моделирование алгоритма обнаружения объектов в изображении при передвижении автономного мобильного робота по неизвестной местности // Международная молодежная конференции «Современные проблемы прикладной математики и информатики» в рамках Фестиваля науки 19–21 сентября 2012 г.: Материалы конференции / Под ред. М.Ю. Орлова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 88-90.
19. Лозовская Е.Г. Исследования по уменьшению погрешности измерения разнвысотности головок тепловыделяющих сборок ТВС атомного реактора // Современные тенденции в образовании и науке: сборник научных трудов по материалам МНПК 31 октября 2013 г.: в 26 ч. Ч. 13: М-во обр. и науки РФ. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 91.

20. Лозовская Е.Г. Модель регистрирующей видеокамеры для измерения разновысотности регулярно расположенных объектов // Фестиваль Недели науки Юга России: Материалы Региональной студенческой конференции: в 3 т. Т. 1. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. – С. 200-202.
21. Лозовская Е.Г. Модель системы технического зрения для измерения разновысотности головок тепловыделяющей сборки атомного реактора // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 3 февраля 2014 г.: в 7 ч. Ч. IV. – М.: АР-Консалт, 2014. – С. 72-73.
22. Лозовская Е.Г. Модель регистрирующей видеокамеры для измерения разновысотности регулярно расположенных объектов // Сборник тезисов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления-2014». Россия, ИКИ РАН, Москва, 18-20 марта 2014 г. – С. 92-95.
23. Лозовская Е.Г. Оценка погрешности измерения разновысотности головок тепловыделяющих сборок атомной электростанции // Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития: Сб. науч. тр. по материалам Международной научно-практической конференции 28 февраля 2014 г. Ч. 10. – Тамбов, 2014.
24. Лозовская Е.Г. Моделирование стереосистемы проецирующей видеокамеры для оценки методической погрешности измерения разновысотности геометрических объектов // X Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН: тезисы докладов (г. Ростов-на-Дону, 14–29 апреля 2014 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2014. – С. 94-95.
25. Сойфер В.А. Методы компьютерной обработки изображений. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.

## REFERENCES

1. Energetika Rossii: problemy i perspektivy. Trudy nauchnoy sessii RAN: Obshch. sobranie RAN 19-21 dekabrya 2005 [Russian energy sector: problems and prospects. Proceedings of the scientific session of the RAS: the RAS General Assembly from 19 to 21 December 2005]. Moscow: Nauka, 2006.
2. Makeev V.V., Povarov V.P., Korobkin V.V., Lebedev O.V. Sistema beskontaktnogo opredeleniya raznovysotnosti golovok teplovodyelayushchikh sborok v aktivnoy zone reaktora [The system for contactless determination raznovysotnyh of heads of fuel assemblies in the reactor core], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2006, No. 16, pp. 37-41.
3. Kalyaev I.A., Korobkin V.V., Kukhareenko A.P., Makeev V.V., Povarov V.P., Rummyantsev K.E. Innovatsionnye razrabotki Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN v oblasti sozdaniya sistem upravleniya dlya atomnoy energetiki [Innovative developments of the southern scientific center of RAS in the field of management systems for nuclear power], *Innovatsii* [Innovations], 2006, No. 10, pp. 62-65.
4. Kalyaev I.A., Rummyantsev K.E., Makeev V.V., Balabaev S.L., Korobkin V.V., Korovin Ya.S., Kukhareenko A.P., Radetskiy V.G. Beskontaktnyy metod opredeleniya raznovysotnosti golovok teplovodyelayushchikh sborok atomnogo reaktora na osnove rekonstruktsii trekhmernykh izobrazheniy [Noncontact method of evaluation of different altitude of top nozzle of nuclear reactor based on reconstruction of three-dimensional images], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 3 (80), pp. 126-131.
5. Balabaev S.L., Radetskiy V.G., Rummyantsev K.E. Telemetricheskiy metod kontrolya raznovysotnosti tsilindricheskikh ob"ektov [The telemetry method of the cylindrical object checking of different height], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 3 (80), pp. 94-110.
6. Korobkin V.V., Korovin Ya.S., Khisamutdinov M.V., Rummyantsev K.E., Balabaev S.L., Makeev V.V. Sistema beskontaktnogo opredeleniya raznovysotnosti golovok teplovodyelayushchikh sborok reaktora [The system for contactless determination raznovysotnyh of heads of fuel assemblies of the reactor]. Patent RF № 103963, 2011. Date of registration 22.12.2010.

7. Balabaev S.L., Kornilova T.A., Lozovskaya E.G., Rumyantsev K.E. Stereoskopicheskaya sistema kontrolya raznovysotnosti golovok teplovydelyayushchikh sborok atomnogo reaktora [Stereoscopic control system raznovysotnyh of heads of fuel assemblies of a nuclear reactor], *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh (PUMSS-2014). Trudy XVI Mezhdunarodnoy konferentsii (30 iyunya–3 iyulya 2014 g, Samara, Rossiya)* [Problems of control and modeling in complex systems (UMSS-2014). Proceedings of the XVI International conference (30 June–3 July 2014, Samara, Russia)]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN, 2014, pp. 673-677.
8. Sistema televizionnaya spetsial'naya STS-PM-100V. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii ITTsYa.463432.005 TO 2000. Firma «Diakont», g. Sankt-Peterburg [Special television system STS-PM-100. Technical description and operating instructions ITZA.463432.005 2,000. The company "Diakont", Saint-Petersburg].
9. Lozovskaya E., Balabaev S., Rumyantsev K. The mathematical model of the recording video camera for the height measurement of the regularly situated objects, *Materiaty X Międzynarodowej naukowii-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki – 2014»*, Vol. 31. Matematyka. Fizyka: Przemysł. Nauka i studia, pp. 27-34.
10. Balabaev S.L., Lozovskaya E.G., Rumyantsev K.E. Otsenka metodicheskoy pogreshnosti izmereniya raznovysotnosti raspolozhennykh v strogom geometricheskom poryadke ob"ektov na osnove tsifrovoy televizionnoy sistemy [Estimates of the error in the height of the strict geometric order of objects based on digital television systems on the CCD], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences],. 20146 No. 8 (157), pp. 227-241.
11. Balabaev S.L., Lozovskaya E.G., Rumyantsev K.E. Metodika otsenki pogreshnosti izmereniya tsifrovoy videosistemoy raznovysotnosti raspolozhennykh v strogom geometricheskom poryadke ob"ektov [Methods of estimating uncertainty of measurement digital video raznovysotnyh arranged in a strict geometric order of the objects], *Fiziko-matematicheskie metody i informatsionnye tekhnologii v estestvoznaniy, tekhnike i gumanitarnykh naukakh: Sbornik materialov mezhdunarodnogo nauchnogo e-simpoziuma. Rossiya, g. Moskva, 27–28 dekabrya 2014 g* [Physico-mathematical methods and informational technologies in science, technology and the Humanities: proceedings of the international scientific e-Symposium. Russia, Moscow, 27-28 December 2014]. Kirov: MTsNIP, 2015, pp. 61-76.
12. PNAE G-1-011-97. Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsiy (OPB-88/97) [General provisions of safety of nuclear power plants]. Moscow: Gosatomnadzor Rossii, 1999. IEC 61513 «Nuclear power plants – Instrumentation and control for systems important to safety General requirements for systems». First edition 2001-03.
13. NP-026-01. Trebovaniya k upravlyayushchim sistemam, vazhnym dlya bezopasnosti atomnykh stantsiy [Requirements to control systems important for safety of nuclear power plants]. Moscow, 2001. Yastrebenetskiy M.A., Vasil'chenko V.N., Vinogradskaya C.B., Gol'drin V.M., Rozen Yu.V., Spektor L.I., Kharchenko B.C. *Bezopasnost' atomnykh stantsiy. Informatsionnye i upravlyayushchie sistemy* [Safety of nuclear power plants. Information and control systems], By ed. M.A. Yastrebenetskogo. Kiev: Tekhnika, 2004.
14. Komplekt kasset VVER-1000. Rukovodstvo po ekspluatatsii 0401.22.00.000 RE [A set of cassettes VVER-1000. Manual 0401.22.00.000 RE].
15. TOB-AES. Tekhnicheskoe obosnovanie bezopasnosti [OBE-NPP. Technical safety justification]. Volgodonsk: Rostovskaya AES, 2000.
16. Ustroystvo zapisi i khraneniya informatsii Rukovodstvo po ekspluatatsii ITTsYa.467617.001 RE [he recording and storage of information Manual ITZA.467617.001 RE].
17. Sistema televizionnaya spetsial'naya STS-PM-100V. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii ITTsYa.463432.005 TO 2000. Firma «Diakont», g. S-Peterburg [Special television system STS-PM-100. Technical description and operating instructions ITZA.463432.005 2,000. The company "Diakont", Saint Petersburg].
18. Lozovskaya E. Modelirovanie algoritma obnaruzheniya ob"ektov v izobrazhenii pri peredvizhenii avtonomnogo mobil'nogo robota po neizvestnoy mestnosti [Simulation of the algorithm for detecting objects in the image when movement of the Autonomous mobile robot in an unknown terrain], *Mezhdunarodnaya molodezhnaya konferentsii «Sovremennye problemy prikladnoy matematiki i informatiki» v ramkakh Festivalya nauki 19–21 sentyabrya 2012 g.:* Materialy konferentsii [International youth conference "Modern problems of applied mathematics and Informatics" within the framework of science Festival 19-21 September 2012: conference Materials], Ed. by M.Yu. Orlova. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 2012, pp. 88-90.

19. *Lozovskaya E.G.* Issledovaniya po umen'sheniyu pogreshnosti izmereniya raznovysotnosti golovok teplovydelyayushchikh sborok TVS atomnogo reaktora [Research to reduce measurement error raznovysotnyh of heads of fuel assemblies fuel Assembly of a nuclear reactor], *Sovremennye tendentsii v obrazovanii i nauke: sbornik nauchnykh trudov po materialam MNPК 31 oktyabrya 2013 g.* [Modern tendencies in science and education: collection of scientific works on materials of MNPК October 31, 2013]: in 26 part. Part 13: M-vo obr. i nauki RF. Tambov: Izd-vo TROO «Biznes-Nauka-Obshchestvo», 2013, pp. 91.
20. *Lozovskaya E.G.* Model' registriruyushchey videokamery dlya izmereniya raznovysotnosti regulyarno raspolozhennykh ob"ektov [Model recording video camera to measure raznovysotnyh regularly spaced objects], *Festival' Nedeli nauki Yuga Rossii: Materialy Regional'noy studencheskoy konferentsii* [Festival of science Week in the South of Russia: materials of the Regional student conference]: in 3 vol. Vol. 1. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2013, pp. 200-202.
21. *Lozovskaya E.G.* Model' sistemy tekhnicheskogo zreniya dlya izmereniya raznovysotnosti golovok teplovydelyayushchey sborki atomnogo reaktora [The model vision system to measure raznovysotnyh head fuel Assembly of a nuclear reactor], *Nauka, obrazovanie, obshchestvo: tendentsii i perspektivy: Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy na-uchno-prakticheskoy konferentsii 3 fevralya 2014 g.* [Science, education, society: trends and prospects: Collection of scientific works on materials of the International scientific-practical conference February 3, 2014]: in 7 part. Part IV. Moscow: AR-Konsalt, 2014, pp. 72-73.
22. *Lozovskaya E.G.* Model' registriruyushchey videokamery dlya izmereniya raznovysotnosti regulyarno raspolozhennykh ob"ektov [Model recording video camera to measure raznovysotnyh regularly spaced objects], *Sbornik tezisov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniya-2014». Rossiya, IKI RAN, Moskva, 18-20 marta 2014 g* [Abstracts of scientific-technical conference "Technical vision in control systems-2014". Russia, IKI, Moscow, 18-20 March 2014], pp. 92-95.
23. *Lozovskaya E.G.* Otsenka pogreshnosti izmereniya raznovysotnosti golovok teplovydelyayushchikh sborok atomnoy elektrostantsii [Assessment of measurement error raznovysotnyh of heads of fuel assemblies of nuclear power plants], *Nauka, obrazovanie, obshchestvo: problemy i perspektivy razvitiya: Sb. nauch. tr. po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 28 fevralya 2014 g.* [Science, education, society: problems and prospects: Collection of scientific works on materials of the International scientific-practical conference February 28, 2014]. Part 10. Tambov, 2014.
24. *Lozovskaya E.G.* Modelirovanie stereosistemy proetsiruyushchey videokamery dlya otsenki metodicheskoy pogreshnosti izmereniya raznovysotnosti geometricheskikh ob"ektov [Modeling projective stereo camera to estimate the methodical error of measurement raznovysotnyh of geometric objects], *X Ezhegodnaya nauchnaya konferentsiya studentov i aspirantov bazovykh kafedr Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN: tezis dokladov (g. Rostov-na-Donu, 14-29 aprelya 2014 g.)* [X Annual scientific conference of students and postgraduate students of basic departments of the southern scientific center of RAS: abstracts of reports (Rostov-on-don, 14-29 April 2014)]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN, 2014, pp. 94-95.
25. *Soyfer V.A.* Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy [Methods of computer image processing]. 2nd ed. – Moscow: Fizmatlit, 2003, 784 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.А. Безуглов.

**Балабаев Сергей Леонидович** – Южный федеральный университет; e-mail: sbalabaev@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371902; кафедра ИБТКС; доцент.

**Лозовская Екатерина Геннадьевна** – e-mail: ek.lozovskaya@yandex.ru; кафедра ИБТКС; ассистент

**Balabaev Sergei Leonidovich** – Southern Federal University; e-mail: sbalabaev@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371902; the department IBTKS; associate professor.

**Lozovskaia Ekaterina Gennadevna** – e-mail: ek.lozovskaya@yandex.ru; the department IBTKS; assistant.