

УДК 621.397.3; 621.039.5

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-2-1-10>

EDN: LIDFVZ

Обоснование выбора телевизионной камеры на ПЗС-матрице для системы бесконтактного контроля тепловыделяющих сборок в условиях радиационного воздействия

 Сердюков П. С.

Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета,
Таганрог, 347922, Российская Федерация

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности бесконтактного контроля геометрических параметров тепловыделяющих сборок в условиях ограниченного доступа к объектам и воздействия ионизирующего излучения. Для реализации метода параллакс-сдвига, использующего последовательные кадры телевизионной камеры при ее дуговом перемещении и формирующего квазистереопары изображений, требуется выбор регистрирующего устройства, обеспечивающего одновременно достаточную разрешающую способность, радиационную стойкость, температурную стабильность и устойчивость параметров изображения. **Целью работы** является обоснование выбора телевизионной камеры на матрице с прибором с зарядовой связью для системы бесконтактного контроля разноразмерности тепловыделяющих сборок в условиях радиационного воздействия. **Методы исследования.** Сформулированы требования к основным техническим характеристикам камеры с учетом условий эксплуатации в активной зоне водо-водяного энергетического реактора. Для сравнительной оценки альтернатив применен метод взвешенных критериев, учитывающий радиационную стойкость, рабочий температурный диапазон, разрешающую способность, геометрическую стабильность и характеристики формируемого изображения. Дополнительно оценено влияние параметров камеры на точность последующего определения разноразмерности методом параллакс-сдвига. **Результаты.** Проведен сравнительный анализ пяти моделей телевизионных камер. Наиболее предпочтительной признана камера Hitachi KP-DE500R, для которой получена интегральная оценка $Q = 0,91$. Показано, что выбранная камера обеспечивает требуемое качество телевизионного изображения и обладает характеристиками, необходимыми для формирования квазистереопар при дуговом перемещении. Верификация измерительного метода с использованием субпиксельной локализации информативных элементов изображения и накопления около 250 квазистереопар показала возможность определения разноразмерности с точностью 1,3–2,0 мм. **Новизна работы** состоит в обосновании выбора типа и конкретной модели телевизионной камеры применительно к измерительной системе на основе параллакс-сдвига с учетом совокупности эксплуатационных и метрологических требований. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при разработке бесконтактных систем телевизионного контроля геометрических параметров тепловыделяющих сборок на атомных электростанциях.

Ключевые слова: ПЗС-матрица, радиационная стойкость, телевизионная камера, АЭС, тепловыделяющие сборки, дискретизация, погрешность измерения

Библиографическая ссылка на статью:

Сердюков П. С. Обоснование выбора телевизионной камеры на ПЗС-матрице для системы бесконтактного контроля тепловыделяющих сборок в условиях радиационного воздействия // Информационные технологии и телекоммуникации. 2026. Т. 14. № 2. С. 1–10. DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-2-1-10. EDN: LIDFVZ

Reference for citation:

Serdyukov P. Justification for Selection of a CCD-based Television Camera for a Non-Contact Inspection System of Fuel Assemblies under Radiation Exposure // Telecom IT. 2026. Vol. 14. Iss. 2. PP. 1–10. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-2-1-10. EDN: LIDFVZ

Введение

Системы бесконтактного контроля тепловыделяющих сборок (ТВС) в активной зоне водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) предъявляют исключительно жесткие требования к применяемой телевизионной камере. Среда эксплуатации характеризуется постоянным фоновым гамма-излучением мощностью до 10^5 рад/ч, водным теплоносителем при температуре до 300–350 °С, давлением до 5 бар и ограниченной освещенностью. При этом результат измерения разновысотности должен иметь точность не более 3 мм, что задает требования к разрешению матрицы и стабильности оптических характеристик¹ [1].

В ранее использовавшейся системе СТС-ПМ-100В применялась видиконная трубка, обеспечивающая разрешение 500–625 телевизионных (ТВ) линий². Переход на ПЗС-матрицы (*аббр. от* прибор с зарядовой связью) дает существенные преимущества, в числе которых равномерность чувствительности отдельных пикселей, высокое отношение сигнал / шум и цифровой выход с постоянной структурой пиксельной сетки [2]. Однако наличие радиационного воздействия требует специального обоснования выбора конкретной модели камеры, которое в опубликованных работах выполнялось без систематического анализа критериев.

Цель настоящей статьи – разработать методику выбора телевизионной камеры для условий активной зоны ВВЭР-реактора с использованием метода взвешенных критериев, провести сравнительный анализ доступных моделей и верифицировать выбор расчетом погрешности дискретизации.

Специфические требования к телевизионной камере

На основе анализа условий эксплуатации системы бесконтактного определения разновысотности сформулированы следующие требования к камере³ [3]:

- радиационная стойкость к гамма-излучению: суммарная доза не менее 10^5 рад;

- рабочая температура окружающей среды: до 350 °С;

- герметичность: не менее 5 бар (работа в водном теплоносителе);

- разрешающая способность: не менее 720 ТВ-линий;

- минимальная освещенность: не более 8 лк;

- минимальное рабочее расстояние до объекта: не более 5 мм.

Требования ранжированы по приоритету в порядке убывания: радиационная стойкость → температурный диапазон → разрешение → световая чувствительность. Первые два критерия являются жесткими ограничениями (камера, не удовлетворяющая хотя бы одному из них, исключается из рассмотрения), третий и четвертый – мягкими, влияющими на взвешенную оценку.

¹ Рабочий технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока № 1. И-00-01.

² Система телевизионная специальная СТС-ПМ-100В. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИТЦЯ.463432.005 ТО. СПб.: Фирма «Диаконт», 2000.

³ Рабочий технологический регламент...

Таблица 1. Требования к телевизионной камере с ранжированием по приоритету

Критерий	Требование	Приоритет
Радиационная стойкость, рад	$\geq 10^5$	жесткий
Рабочая температура, °C	до 350	жесткий
Разрешение, ТВ-линий	≥ 720	высокий
Световая чувствительность, лк	≤ 8	средний
Герметичность, бар	≥ 5	высокий
Рабочее расстояние, мм	≤ 5	средний

Влияние параметров ПЗС-матрицы на точность измерений

Дискретная структура ПЗС-матрицы является источником погрешности дискретизации координат: при проецировании точки пространства на матрицу ее координатам присваивается положение центра пикселя. Величина p_{obj} – масштабный коэффициент (мм/пикс.), определяющий пространственное разрешение системы, – не является непосредственно погрешностью измерения высоты. Проекция единичного пикселя на плоскость объекта (мм) выглядит следующим образом:

$$p_{obj} = s \cdot \frac{Z}{f}, \quad (1)$$

где s – физический размер пикселя (мм); Z – рабочее расстояние (мм); f – фокусное расстояние (мм). Для камеры Hitachi KP-DE500R: $s = 0,0083$ мм; $f \approx 8$ мм. Если $Z = 1300$ мм, $p_{obj} = 0,0083 \times 1300/8 = 1,35$ мм/пикс.

Погрешность локализации $\sigma_{лок}$ характерной точки в плоскости объекта при ошибке Δd пикселей в определении ее позиции на изображении выражается формулой:

$$\sigma_{лок} = p_{obj} \cdot \frac{\Delta d}{2} = 0,675 \cdot \Delta d.$$

При $\Delta d = 1$ пикс. (без субпиксельной обработки) $\sigma_{лок} \approx 0,675$ мм – погрешность пространственной локализации точки. Погрешность восстановления высоты ΔZ по диспаратности d – отдельная величина: $\Delta Z = Z \cdot \frac{\Delta d}{d}$ (оценивается ниже). После субпиксельной локализации Δd снижается до 0,1–0,2 пикс., что обеспечивает $\sigma_{лок} \approx 0,07$ –0,14 мм – пренебрежимо малую составляющую в суммарной погрешности.

На рисунке 1 показана зависимость погрешности дискретизации от размера пикселя $Z = 1300$ мм; $f = 8$ мм; отмечено положение Hitachi KP-DE500R. Пунктиром дана погрешность локализации $\sigma_{лок} = \frac{p_{obj}}{2}$ (при $\Delta d = 1$ пикс.).

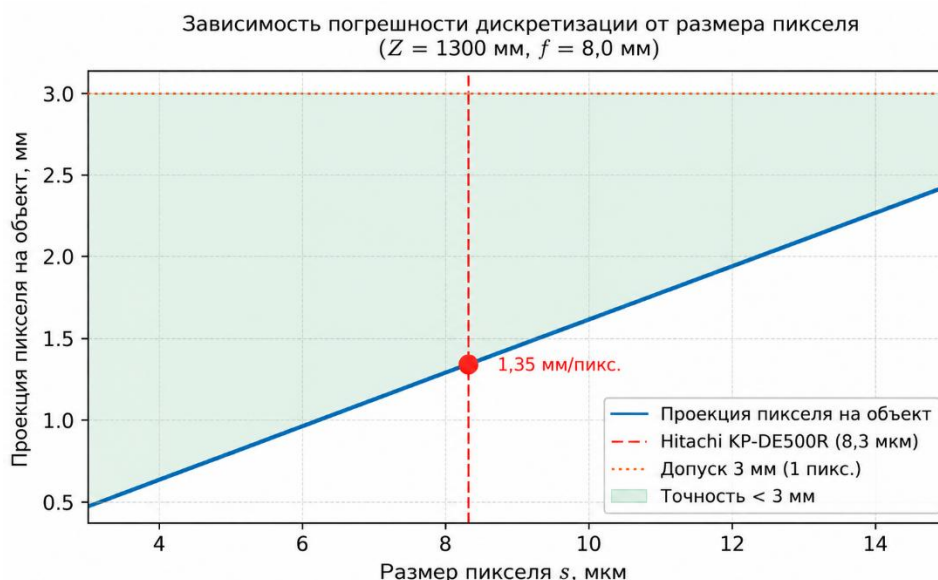


Рис. 1. Зависимость масштабного коэффициента p_{obj} от физического размера пикселя s

Сравнительный анализ моделей камер

В рамках исследования были рассмотрены пять моделей камер, применяемых или рекомендованных для работы в ядерных средах. Результаты сравнения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ телевизионных камер для условий активной зоны ВВЭР

Параметр	Модель камеры				
	Hitachi KP-DE500R	Toshiba IK-HR3H	Radcam Loki	Диаконт UTP-97LPDT	thermoIMAGER TIM QVGA
Радиационная стойкость, рад	до 10^5	$< 10^5$	до 5×10^4	высокая	высокая
Максимальная температура, °C	300–350	до 90	до 60	нет данных	высокая
Разрешение, пикс.	768×576	Full HD	нет данных	нет данных	382×288
Минимальная освещенность, лк	8,0	8,2*	0,5**	нет данных	не указано
Заключение	выбрана	температура недостаточна	температура недостаточна	недостаточно данных для анализа	ИК-камера, непригодна

* Toshiba IK-HR3H: 8,2 лк (50 Гц, F2.2, усиление 20 дБ; по данным Aegis Electronic Group).

** Radcam Loki: 0,5 лк (F2.5; по данным ISEC Monitoring Systems).

Метод взвешенных критериев

Для количественного сравнения введем интегральную оценку качества камеры:

$$Q = \sum w_i \cdot \frac{r_i}{r_{i\max}}, \quad (2)$$

где w_i – вес i -го критерия; r_i – фактическое значение параметра; $r_{i\max}$ – максимальное значение среди рассматриваемых камер; $\sum w_i = 1$. Для критерия световой чувствительности (минимальная рабочая освещенность, лк), где меньшее значение соответствует лучшей чувствительности, применяется инвертированная нормировка: $w_i \cdot \frac{r_{i\min}}{r_i}$. Веса критериев:

- радиационная стойкость: $w_1 = 0,40$;
- рабочая температура: $w_2 = 0,30$;
- разрешение: $w_3 = 0,20$;
- световая чувствительность: $w_4 = 0,10$.

Веса определены методом экспертного ранжирования в соответствии с иерархией приоритетов, описанной выше: критерии-фильтры (радиационная стойкость и рабочая температура) получают удвоенный вес относительно мягких критериев (разрешение и световая чувствительность); принятое соотношение 4:3:2:1 нормировано до $\sum w_i = 1$.

Таблица 3. Взвешенные оценки камер-кандидатов*

Модель	$Q_{\text{рад}} (\times 0,40)$	$Q_{\text{тем}} (\times 0,30)$	$Q_{\text{разреш}} (\times 0,20)$	$Q_{\text{чувств}} (\times 0,10)$	$Q_{\text{итог}}$
Hitachi KP-DE500R	0,40	0,30	0,20	0,01	0,91
Toshiba IK-HR3H	0,36	0,08	0,20	0,01	0,65
Radcam Loki	0,20	0,05	0,00	0,10	0,35

* Для камеры Radcam Loki $Q_{\text{разреш}} = 0,00$ (данные о разрешении в открытых источниках отсутствуют). $Q_{\text{чувств}}$: инвертированная нормировка $\frac{r_{i\min}}{r_i}$, где $r_{i\min} = 0,5$ лк. Hitachi: $0,10 \times 0,5/8,0 \approx 0,01$; Toshiba: $0,10 \times 0,5/8,2 \approx 0,01$; Radcam: $0,10 \times 0,5/0,5 = 0,10$.

Камера Hitachi KP-DE500R получает максимальную интегральную оценку $Q = 0,91$, что подтверждает ее выбор в качестве основы для системы бесконтактного определения разновысотности. Ключевые параметры выбранной камеры: радиационная стойкость 10^5 рад (по данным технической документации⁴ [3]), рабочая температура 300–350 °С, разрешение 768×576 пикс., минимальная освещенность 8,0 лк, размер пикселя 8,3 мкм, тип матрицы – ПЗС (CCD). ПЗС-матрица в условиях радиации предпочтительнее КМОП (комплементарная

⁴ Система телевизионная специальная СТС-ПМ-100В...

структура металл – оксид – полупроводник): кремниевые p-n-переходы ПЗС менее чувствительны к эффекту накопленного заряда при дозах до 10^5 – 10^6 рад [2].

Анализ чувствительности результатов

Для оценки устойчивости выбора проведен анализ чувствительности интегральной оценки к вариациям весовых коэффициентов. При изменении w_1 в пределах $\pm 20\%$ от номинального значения ($w_1 = 0,32$ – $0,48$) оценка Hitachi KP-DE500R изменяется в диапазоне $0,83$ – $0,99$, тогда как у ближайшего конкурента Toshiba IK-HR3H она не превышает $0,57$ – $0,72$. Разрыв между лидером и вторым местом составляет не менее $0,25$ единиц при любом разумном распределении весов, что подтверждает устойчивость результата.

На рисунке 2 представлено сравнение камер по анализируемым критериям, где сечение столбца соответствует вкладу каждого критерия; над столбцом – итоговый балл Q .

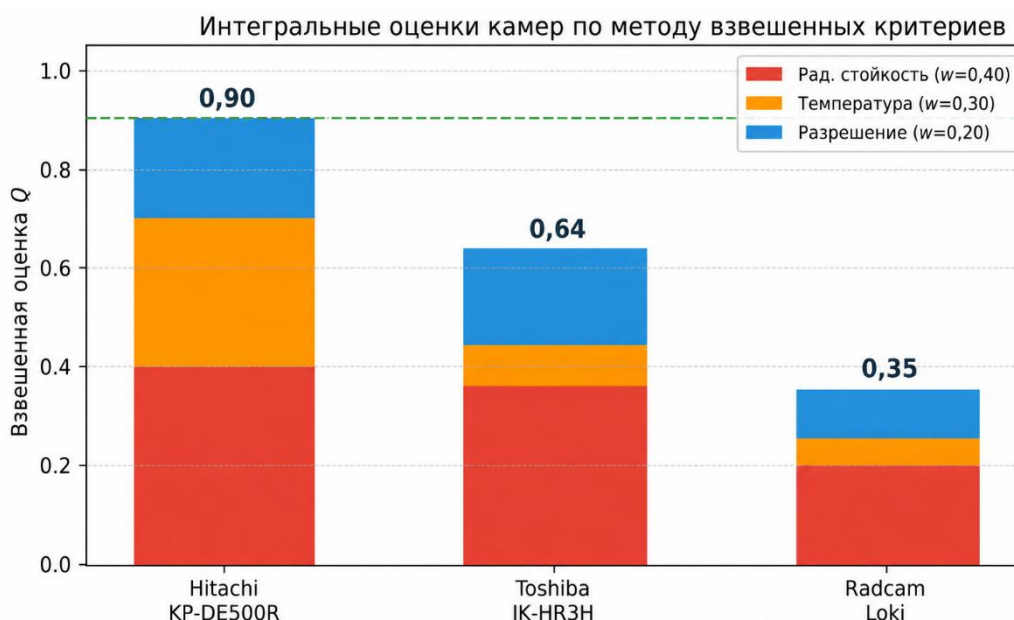


Рис. 2. Сравнение камер-кандидатов по методу взвешенных критериев

Верификация выбора через расчет погрешности

Подставим параметры Hitachi KP-DE500R в формулу (1) и оценим ожидаемую точность системы. При $Z = 1300$ мм, $f = 8$ мм, $s = 0,0083$ мм, базис $B = 12$ мм фокусное расстояние в пикселях можно вычислить так:

$$f_{\text{пикс}} = \frac{f}{s} = \frac{8}{0,0083} \approx 964; \quad d = f_{\text{пикс}} \cdot \frac{B}{Z} = 964 \cdot \frac{12}{1300} \approx 8,9.$$

Малое значение $d \approx 8,9$ пикс. обусловлено минимальным базисом $B = 12$ мм при большой дальности $Z = 1300$ мм. Погрешность восстановления высоты по диспаратности оценивается по формуле: $\Delta Z = Z \cdot \frac{\Delta d}{d}$.

Сценарий А (без субпиксельной обработки, $\Delta d = 1$ пикс.):

$\Delta Z_A = 1300 \times 1/8,9 \approx 146$ мм – неприемлемо для одиночного замера; данный результат обосновывает необходимость субпиксельной локализации.

Сценарий Б (субпиксельная локализация [4], $\Delta d = 0,15$ пикс., одна квазистереопара):

$\Delta Z_B = 1300 \times 0,15/8,9 \approx 22$ мм; данный результат обосновывает накопление N квазистереопар.

Сценарий В (метод параллакс-сдвига с накоплением $N \approx 250$ квазистереопар и статистическим усреднением [5]):

$$\sigma_{\text{итог}} = \frac{\Delta Z_B}{\sqrt{N}} = \frac{22}{\sqrt{250}} \approx 1,4.$$

Экспериментальная верификация [5–7] подтвердила: при базисе 12 мм и высоте подвеса 1300 мм средняя погрешность составила $\pm 1,3$ мм, максимальная – $\pm 2,0$ мм, что соответствует расчетным оценкам при $\Delta d \approx 0,15$ пикс. и 250 квазистереопарах.

Таким образом, расчет обосновывает применение обеих техник – субпиксельной локализации и накопления квазистереопар – для достижения требуемой точности 1,3–2,0 мм при параметрах выбранной телевизионной камеры Hitachi KP-DE500R.

Заключение

Разработана методика выбора телевизионной камеры для системы бесконтактного контроля ТВС в условиях активной зоны реактора ВВЭР. Сформулированы специфические требования с ранжированием по приоритету. Применен метод взвешенных критериев (формула (2)) с обоснованными весами (4:3:2:1); анализ чувствительности подтвердил устойчивость результата. На основании сравнительного исследования пяти моделей максимальную интегральную оценку $Q = 0,91$ получила камера Hitachi KP-DE500R, удовлетворяющая всем жестким ограничениям (радиационная стойкость 10^5 рад, температура 300–350 °С) и обеспечивающая достаточное разрешение (768×576 пикс., пиксель 8,3 мкм). Верификация подтвердила: при субпиксельной локализации ($\Delta d \approx 0,15$ пикс.) и накоплении $N \approx 250$ квазистереопар расчетная точность $\sigma \approx 1,4$ мм, экспериментально подтвержденная – $\pm 1,3$ – $2,0$ мм.

Литература

1. Макеев В. В., Поваров В. П., Коробкин В. В., Лебедев О. В. Система бесконтактного определения разновысотности головок тепловыделяющих сборок в активной зоне реактора // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № 16. С. 37–41.
2. Румянцев К. Е. Бесконтактное измерение геометрических размеров изделий прокатно-металлургического производства. Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2004. 155 с.
3. Каляев И. А., Румянцев К. Е., Макеев В. В. Балабаев С. Л., Коробкин В. В. и др. Бесконтактный метод определения разновысотности головок тепловыделяющих сборок атомного реактора на основе реконструкции трехмерных изображений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 3 (80). С. 126–131. EDN: KNOFEN
4. Сердюков П.С. Влияние субпиксельной локализации контуров на точность определения разновысотности ТВС методом параллакс-сдвига // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности». Таганрог, 2026. (в печати)
5. Сердюков П. С., Румянцев К. Е. Исследование погрешностей бесконтактного измерения разновысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига при дуговой траектории телевизионной камеры // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19. № 4. С. 92–109. DOI: 10.55648/1998-6920-2025-19-4-92-109. EDN: YKYWJR
6. Сердюков П. С., Румянцев К. Е. Метод параллакс-сдвига для бесконтактного измерения разновысотности головок ТВС на основе видеопотока телевизионной камеры // Проектирование и технология электронных средств. 2025. № 4. С. 13–19. EDN: WTMLXG
7. Балабаев С. Л., Лозовская Е. Г., Румянцев К. Е. Оценка разновысотности расположенных в строгом геометрическом порядке объектов на основе цифровой телевизионной системы на ПЗС-матрицах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 8 (157). С. 227–241. EDN: STQRKT

Статья поступила 12 мая 2026 г.
Одобрена после рецензирования 17 июня 2026 г.
Принята к публикации 03 августа 2026 г.

Информация об авторе

Сердюков Павел Сергеевич – соискатель ученой степени кандидата наук (Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета). E-mail: serdyukov-pavel@mail.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-2-1-10>
EDN: LIDFVZ

Justification for Selection of a CCD-based Television Camera for a Non-Contact Inspection System of Fuel Assemblies under Radiation Exposure

 P. Serdyukov

Institute of Radio Engineering Systems and Management of Southern Federal University,
Taganrog, 347922, Russian Federation

The relevance of the study is the need to improve the reliability of non-contact control of the geometric parameters of fuel assemblies under conditions of limited access to the objects and exposure to ionizing radiation. The implementation of the parallax-shift method, which uses sequential frames acquired by a television camera during its arc-shaped motion to form quasi-stereo pairs of images, requires the selection of an imaging device that simultaneously provides sufficient spatial resolution, radiation resistance, temperature stability, and stability of image parameters. The aim of this study is to substantiate the selection of a charge-coupled device (CCD)-based television camera for a non-contact system for measuring the height differences of fuel assemblies under radiation exposure. **Methods.** Requirements for the main technical characteristics of the camera were established based on the operating conditions in the core of a water-cooled, water-moderated power reactor. A weighted-criteria method was applied to comparatively evaluate the alternatives, taking into account radiation resistance, operating temperature range, spatial resolution, geometric stability, and characteristics of the generated image. In addition, the influence of camera parameters on the accuracy of subsequent height-difference determination using the parallax-shift method was evaluated. **Results.** A comparative analysis of five television camera models was performed. The Hitachi KP-DE500R camera was identified as the most preferable option, with an integrated score of $Q = 0.91$. It was demonstrated that the selected camera provides the required television image quality and possesses the characteristics necessary for forming quasi-stereo pairs during arc-shaped camera motion. Verification of the measurement method using subpixel localization of informative image elements and the accumulation of approximately 250 quasi-stereo pairs demonstrated the feasibility of determining height differences with an accuracy of 1.3–2.0 mm. **The novelty** of the study lies in substantiating the selection of the type and specific model of a television camera for a measurement system based on the parallax-shift method, taking into account a combination of operational and metrological requirements. **Practical significance.** The results obtained can be used in the development of non-contact television inspection systems for monitoring the geometric parameters of fuel assemblies at nuclear power plants.

Key words: CCD matrix, radiation hardness, television camera, nuclear power plant, fuel assemblies, discretization, measurement error

References

1. Makeev V. V., Povarov V. P., Korobkin V. V., Lebedev O. V. System for the Non-Contact Determination of the Variability of Heat-Producing Grouting Heads in the Active Zone of the Reactor // News of Higher Education Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences. 2006. Iss. 16. PP. 37–41. (in Russian)
2. Rumyantsev K. E. Non-contact Measurement of the Geometric Dimensions of Products in the rolling and Metallurgical Industry. Shakhty: SRSUES Publ., 2004. 155 p.
3. Kalyaev I. A., Rumyantsev K. E., Makeev V. V., Balabaev S. L., Korobkin V. V., et al. Noncontact Method of Evaluation of Different Altitude of Top Nozzle of Nuclear Reactor Based on Reconstruction of Three-Dimensional Images // Izvestiya

SFEDU. Engineering Sciences. 2008. Iss. 3 (80). PP. 126–131. (in Russian)
EDN: KNOFEN

4. Sredyukov P. S. Influence of Subpixel Localization of Contours on the Accuracy of Determination of the Degree of complexity of HSS by Parallax-Shift Method // XII All-Russian Scientific and Technical Conference “Fundamental and Applied Aspects of Computer Technologies and Information Security”. Taganrog, 2026. (in print, in Russian)

5. Serdyukov P. S., Rumyantsev K. E. Investigation of Errors in Non-Contact Measurement of Fuel Assembly Head Height Variations Using the Parallax-Shift Method with an Arc-Trajectory Television Camera // Vestnik SibGUTI. 2025. Vol. 19. Iss. 4. PP. 92–109. (in Russian) DOI: 10.55648/1998-6920-2025-19-4-92-109. EDN: YKYWJR

6. Serdyukov P. S., Rumyantsev K. E. Parallax-Shift Method for Non-Contact Measurement of Fuel Assembly Head Height Differences Using television Camera Video Stream // Electronic Design and Technology. 2025. Iss. 4. PP. 13–19. (in Russian) EDN: WTMLXG

7. Balabaev S. L., Lozovskaya E. G., Rumyantsev K. E. Estimates of the Error in the Height of the Strict Geometric Order of Objects Based on Digital Television Systems on the CCD // Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences. 2014. Iss. 8 (157). PP. 227–241. (in Russian) EDN: STQRKT

Information about Author

Serdyukov Pavel – PhD candidate (Institute of Radio Engineering Systems and Management of Southern Federal University). E-mail: serdyukov-pavel@mail.ru