

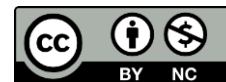
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД  
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING  
COMMISSIONING OF EQUIPMENT  
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-03>

УДК 528.4:621.039

EDN DMIDHK

Оригинальная статья / Original paper



**Применение наземного лазерного сканирования при пусконаладочных работах на АЭС: опыт и перспективы**

И.И. Зайкин<sup>1</sup>✉, С.И. Рясный<sup>2</sup>, К.В. Булахтин<sup>3</sup>, А.В. Щугорев<sup>3</sup>, Р.Ш. Валеев<sup>1</sup>,  
Н.А. Карпенко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>АО «Аккую Нуклеар», Гюльнар, Мерсин, Турецкая Республика

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>АО «Атомтехэнерго», г. Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup>РУП «Белорусская АЭС», Ворнянский с/с, Островецкий район, Гродненская обл., Республика Беларусь

✉ zaykin@hotmail.com

**Аннотация.** В процессе строительства и монтажа АЭС в ее проект вносятся неизбежные изменения, вследствие чего возникают отличия реального физического состояния построенной АЭС от ее проектной цифровой модели. Вследствие системного ограничения традиционных методов документирования, при которых фиксируются лишь те параметры, которые считаются значимыми на момент приемки работ, исполнительная документация, которая должна отражать эти изменения, не всегда содержит геометрическую информацию с той степенью детализации, которая требуется для инженерных расчетов. Для некоторых инженерных задач, возникающих при пусконаладочных работах (ПНР), требуются данные о фактическом состоянии объектов с точностью и полнотой, практически недостижимыми при традиционном визуальном контроле и ручных обмерах, но достигаемыми с помощью современной технологии наземного лазерного сканирования (НЛС). Представлен анализ применения НЛС при ПНР на атомных электростанциях, а также при выводе ядерных объектов из эксплуатации. На основе опыта работ на резервной дизельной электростанции энергоблока № 3 Ростовской АЭС, на энергоблоке № 2 Белорусской АЭС и при обследовании главного корпуса энергоблоков Нововоронежской АЭС показана практическая эффективность метода для решения конкретных инженерных задач: верификации фактического положения оборудования, обоснования сейсмостойкости, документирования состояния объекта на момент приемки. Установлено систематическое расхождение между данными традиционной документации и фактическим состоянием смонтированного оборудования. Установлено, что однажды созданное облако точек является долгосрочным информационным активом, применимым как при пусконаладочных работах, так и в ходе последующей эксплуатации. Показаны возможные направления применения технологии НЛС в рамках ПНР и в период промышленной эксплуатации. Рассмотрены условия целесообразного применения НЛС, его ограничения и перспективы использования на строящихся АЭС российского дизайнера, в частности на АЭС «Аккую».

**Ключевые слова:** наземное лазерное сканирование, лазерный сканер, пусконаладочные работы, верификация конфигурации, цифровая модель, сейсмостойкость, облако точек

**Для цитирования:** Зайкин И.И., Рясный С.И., Булахтин К.В., Щугорев А.В., Валеев Р.Ш., Карпенко Н.А. Применение наземного лазерного сканирования при пусконаладочных работах на АЭС: опыт и перспективы. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):27-40. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-03>

**For citation:** Zaykin I.I., Ryasny S.I., Bulakhtin K.V., Shchugorev A.V., Valeev R.Sh., Karpenko N.A. Application of terrestrial laser scanning in NPP commissioning works: experience and prospects. *Nuclear Safety*. (In Russ.). 2026;16(2):27-40. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-03>

## Application of terrestrial laser scanning in NPP commissioning works: experience and prospects

Ivan I. Zaykin<sup>1</sup> ✉, Sergey I. Ryasny<sup>2</sup>, Konstantin V. Bulakhtin<sup>3</sup>, Aleksey V. Shchugorev<sup>3</sup>,  
Rinat Sh. Valeev<sup>1</sup>, Nikolai A. Karpenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Akkuyu Nuclear JSC, Gulnar, Mersin, Republic of Turkey

<sup>2</sup>National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI), Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>JSC «Atomtekhenergo», Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup>SUE «Belarusian NPP», Vornyan village council, Ostrovets district, Grodno region, Republic of Belarus

✉ zaykin@hotmail.com

**Abstract.** During the construction and installation of a nuclear power plant, unavoidable changes are introduced into its design, resulting in differences between the actual physical condition of the constructed NPP and its digital design model. Due to the systemic limitations of traditional documentation methods, which record only those parameters considered significant at the time of acceptance of work, the as-built documentation does not always contain geometric information with the degree of detail required for engineering calculations. Certain engineering tasks arising during commissioning and start-up operations require data on the actual condition of facilities with a level of accuracy and comprehensiveness that is virtually unattainable through traditional visual inspection and manual measurements, but which can be achieved using modern terrestrial laser scanning (TLS) technology. An analysis of TLS application during commissioning works at nuclear power plants and during nuclear facility decommissioning is presented. Based on the experience of work at the backup diesel power plant of power unit No. 3 of the Rostov NPP, at power unit No. 2 of the Belarusian NPP, and during the survey of the main building of Novovoronezh NPP power units, the practical effectiveness of the method for solving specific engineering problems is shown: verification of the actual position of the equipment, justification of earthquake resistance, documentation of the condition of the object at the time of acceptance. A systematic discrepancy between traditional documentation data and the actual condition of installed equipment has been established. It has been established that once a point cloud is created, it is a long-term information asset, applicable both during commissioning and during subsequent operation. Possible directions of application of the TLS technology within the framework of the commissioning work and during the period of industrial operation are shown. The conditions for rational application of TLS, its limitations and prospects for use at Russian-designed NPPs under construction, particularly at Akkuyu NPP, are considered.

**Keywords:** terrestrial laser scanning, laser scanner, commissioning works, configuration verification, digital model, seismic qualification, point cloud

Современные атомные электростанции российского дизайна проектируются и строятся с применением трехмерных цифровых моделей. Генеральный проектировщик формирует проектную цифровую модель объекта, которая охватывает все системы станции и служит основой для выпуска рабочей документации.

Проектная цифровая модель АЭС создается на основе конструкторской документации и отражает объект таким, каким он должен быть построен. Однако после завершения монтажа на практике возникает неизбежный разрыв между этой моделью и фактическим состоянием построенного объекта, так как в процессе монтажа принимаются многочисленные технические решения, не предусмотренные проектом или отличающиеся от него в деталях: трасса трубопровода может быть изменена во избежание

конфликта с другими коммуникациями; опорная конструкция может быть переработана на месте для обеспечения доступа к смежному оборудованию; крепежные элементы могут устанавливаться с отклонениями, допустимыми с точки зрения монтажных допусков, но значимыми для расчетных задач.

Исполнительная документация, которая должна отражать эти изменения, не всегда содержит геометрическую информацию с той степенью детализации, которая требуется для инженерных расчетов. Это является следствием системного ограничения традиционных методов документирования, при которых фиксируются лишь те параметры, которые считаются значимыми на момент приемки работ. Однако для некоторых инженерных задач, возникающих при ПНР, требуются данные о фактическом состоянии

объекта с точностью и полнотой, принципиально недостижимыми при ручных обмерах.

Наземное лазерное сканирование (НЛС) – технология дистанционного получения трехмерных координат поверхностей объектов, позволяющая создать детальную цифровую модель фактического состояния помещений и оборудования непосредственно в том виде, в каком они существуют на момент съемки. В отличие от проектной модели, отражающей замысел конструктора, результат сканирования фиксирует реальное физическое состояние.

Таким образом, НЛС не заменяет проектную цифровую модель и не конкурирует с ней. НЛС является инструментом верификации, позволяющим восполнить недостающие геометрические данные там, где традиционные методы документирования оказываются недостаточными.

При наземном лазерном сканировании автоматически измеряются координаты множества точек поверхности объекта путем последовательного направления лазерного луча по различным азимутам и углам возвышения. Современные сканирующие системы позволяют выполнять до нескольких миллионов измерений в секунду и обеспечивают угловое покрытие  $360^\circ$  по горизонтали и до  $270^\circ$  по вертикали.

Результатом сканирования является облако точек – совокупность трехмерных координат, описывающая видимые поверхности всех объектов в зоне досягаемости сканера. Каждая точка облака имеет известные пространственные координаты в системе отсчета прибора. При проведении съемки с нескольких станций (позиций сканера) результаты объединяются в единое облако точек в общей системе координат в ходе камеральной обработки.

Важным свойством облака точек является его архивный характер: в нем содержатся координаты всех видимых поверхностей объекта, а не только тех, которые представляли интерес на момент съемки. Это означает, что при возникновении новых вопросов к геометрии объекта можно обратиться к уже созданному облаку точек, не проводя повторную съемку.

Принципиальная целесообразность применения НЛС для технических задач убедительно продемонстрирована при проектировании и реконструкции трубопроводных систем промышленных установок [1] и при модернизации судовых систем [2].

Применение НЛС на ядерных объектах – в том числе для документирования фактического состояния помещений и оборудования, поддержки вывода из эксплуатации и обеспечения радиационной безопасности – активно развивалось в последние годы – применительно к эксплуатации и техническому обслуживанию действующих блоков [3], поддержке цифрового строительного контроля [4] и оценке объемов демонтажа при выводе из эксплуатации [5].

Компанией ГК «Неолант» (Москва) в рамках разработки платформы Digital Decommissioning были выполнены работы по лазерному сканированию главного корпуса энергоблоков № 1 и 2 Нововоронежской АЭС в целях создания цифровой исполнительной инженерно-радиационной модели объекта для поддержки вывода из эксплуатации<sup>1</sup>. Результаты показали, что сведения традиционного «бумажного» обследования систематически расходятся с данными, полученными по результатам лазерного сканирования: в главном корпусе 1, 2 блоков Нововоронежской АЭС (НВАЭС) выявлено занижение количества металлических конструкций в реестре на 45 %; значительные расхождения зафиксированы более чем в 20 % помещений. Этот опыт самостоятельно подтверждает тезис, обоснованный в настоящей статье: исполнительная документация не отражает реальное состояние объекта с точностью, необходимой для инженерных расчетов. Облако точек, созданное на объекте, сохраняет ценность на протяжении всего жизненного цикла станции, вплоть до окончательного вывода из эксплуатации, что дополнительно обосновывает целесооб-

<sup>1</sup> Тихоновский В.Л., Гуралев С.С. Ключевые проблемы сферы ВЭ ОИАЭ. Результаты практического применения платформы Digital Decommissioning : доклад на конференции по обращению с РАО. – Москва: АО ГК «Неолант», 2023. – Режим доступа: <https://u.to/9qySIg> (дата обращения: 25.03.2026).

разность формирования такого актива уже в период ПНР. Вместе с тем применение НЛС именно в контексте пусконаладочных работ на строящихся АЭС является относительно менее изученным направлением, что и определяет актуальность настоящей работы.

В настоящей работе на основе конкретного опыта применения данной технологии при ПНР на АЭС показаны возможности, условия и перспективы ее использования на строящихся АЭС и при дальнейшей эксплуатации. В качестве опыта применения рассмотрены три практических случая: работы на резервной дизельной электростанции (РДЭС) энергоблока № 3 Ростовской АЭС<sup>2</sup>, работы на оборудовании энергоблока № 2 Белорусской АЭС (БелАЭС), а также обследование главного корпуса НВАЭС, проведенное в рамках задач вывода из эксплуатации.

### Опыт применения НЛС на Ростовской АЭС

Работы по наземному лазерному сканированию проводились на РДЭС энергоблока № 3 Ростовской АЭС в период сооружения объекта. Задача состояла в восстановлении информационной модели: сравнении проектной трехмерной модели с фактическим состоянием конструкций и оборудования на момент съемки.

Следует подчеркнуть, что речь идет о работах на РДЭС – отдельном здании в составе энергоблока, а не об энергоблоке в целом. Это принципиально важно для оценки трудозатрат и масштаба работ. Вместе с тем именно этот опыт является первым задокументированным случаем применения НЛС на АЭС для задач верификации конфигурации.

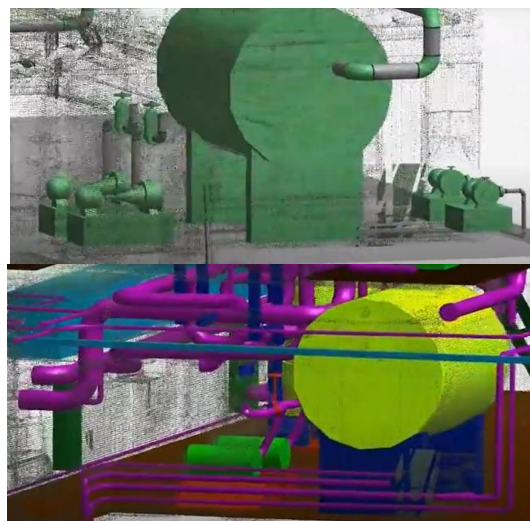
На Ростовской АЭС применялись сканеры Leica ScanStation P20, относящиеся к профессиональному классу наземных сканеров

с дальностью действия до 120 метров и точностью 3 мм на расстоянии 50 м.

За два дня полевых работ была выполнена съемка с 38 станций. Выполнение сканирования осложнялось проводившимися параллельно совмещенными строительно-монтажными работами на объекте. Однако бесконтактный характер метода и скорость съемки позволили свести к минимуму взаимное влияние совмещенных работ.

Первичная камеральная обработка – объединение результатов съемки со всех 38 станций в единое облако точек в общей системе координат – была выполнена за один рабочий день.

Последующее создание векторной модели из облака точек (рис. 1) потребовало 23 человеко-дней. Этот показатель заслуживает отдельного комментария: он отражает трудоемкость не сканирования как такового, а последующего моделирования – построения геометрических объектов (трубопроводов, конструкций, оборудования) по данным облака точек. Данная работа является преимущественно ручной, несмотря на наличие инструментов автоматического распознавания геометрических примитивов в современных программных комплексах. Это важная характеристика технологии, которую необходимо учитывать при планировании работ.



**Рисунок 1.** Проектная 3D модель оборудования РДЭС Ростовской АЭС, наложенная на облако точек, полученных в результате сканирования и полученная в результате уточненная 3D модель

**Figure 1.** Design 3D model of BDPP equipment at Rostov NPP superimposed on the point cloud obtained from scanning, and the resulting refined 3D model

<sup>2</sup> Аникушкин М., Белецкий Е., Окунькова Е., Серков С., Смирнов С. Лазерное сканирование и 3D-моделирование для восстановления информационной модели Ростовской АЭС. – ISICAD. – 2014. – Режим доступа: <https://isicad.ru/ru/articles.php?article%20num=17243> (дата обращения: 25.03.2026)

Работы на Ростовской АЭС имеют важное методологическое значение: они показывают, что технология НЛС применима на объектах атомной энергетики в условиях продолжающегося строительства, а полевая часть работ может быть выполнена в минимальные сроки при относительно небольшом количестве станций. Основная трудоемкость сосредоточена в камеральной обработке и зависит от конечной цели: если требуется полная векторная модель, затраты существенны; если достаточно облака точек для метрических измерений или локального анализа – они значительно ниже.

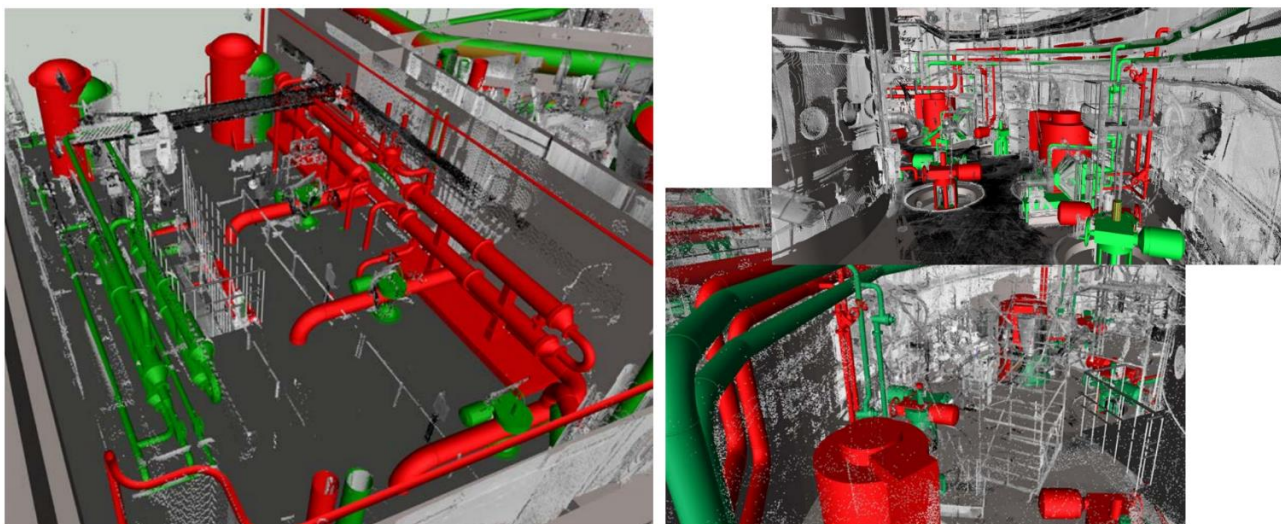
Вместе с тем опыт Ростовской АЭС охватывал только задачу восстановления информационной модели. Параллельно схожая по методу, но принципиально отличная по масштабу и цели работа была выполнена при обследовании Нововоронежской АЭС.

### Опыт применения НЛС на Нововоронежской АЭС

Компанией ГК «Неолант» в рамках разработки платформы цифрового вывода из эксплуатации Digital Decommissioning были выполнены работы по лазерному сканированию и сферическому фотографированию главного корпуса энергоблоков № 1 и 2 НВАЭС. Целью работ являлось создание цифровой

исполнительной инженерно-радиационной модели (ЦИИРМ) – актуализированной трехмерной модели объекта, отражающей фактическое состояние помещений и оборудования и служащей информационной основой для проектирования работ по выводу из эксплуатации. В отличие от опыта Ростовской и Белорусской АЭС, задача здесь состояла не в обеспечении ПНР, а в документировании давно эксплуатируемого объекта, исходная документация которого к тому моменту в значительной мере утратила актуальность.

Методология работ предусматривала сопоставление трехмерной модели, построенной по исходной проектной и исполнительной документации, с моделью, полученной по результатам лазерного сканирования (рис. 2). Такое сравнение позволяет выявить все отклонения фактического состояния объекта от документального – в том числе несанкционированные изменения, накопленные за десятилетия эксплуатации. Результатом являлась ЦИИРМ – модель, одновременно включающая инженерные и радиационные данные по каждому элементу оборудования и строительных конструкций, необходимые для расчета объемов радиоактивных отходов и планирования демонтажных работ.

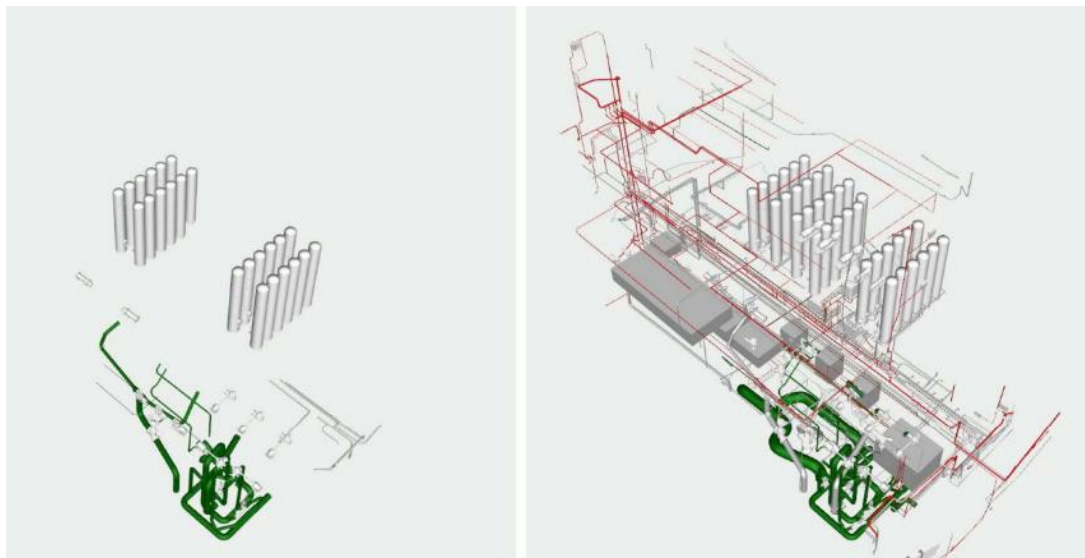


**Рисунок 2.** Сравнение трехмерной модели главного корпуса НВАЭС, выполненной по документации (красный цвет), и модели, откорректированной по результатам лазерного сканирования и сферического фотографирования (зеленый цвет); расхождения охватывают трубопроводные трассы, опорные конструкции и технологическое оборудование

**Figure 2.** Comparison of the 3D model of the Novovoronezh NPP, main building constructed from documentation (in red) and the model corrected based on laser scanning and spherical photography results (in green); discrepancies cover pipeline routes, support structures and process equipment

Масштаб выявленных расхождений оказался значительным. В главном корпусе энергоблоков № 1 и 2 НВАЭС занижение массы металлических конструкций в традиционном реестре составило 45 %, что в абсолютном выражении соответствует примерно 5600 тоннам неучтенного металла. Значительные расхождения зафиксированы более чем в 20 % обследованных помещений.

Сравнение по отдельному помещению насосов промежуточного контура А062/1 (рис. 3) иллюстрирует типичный характер выявленных отклонений: при суммарной массе по реестру около 200 тонн данные ЦИИРМ дают около 140 тонн, причем распределение по категориям принципиально иное – ряд категорий (трубопроводы, кабель, воздуховоды) в традиционном реестре не учтены вовсе.



**Рисунок 3.** Сравнение трехмерной модели, построенной по проектной документации (слева), и модели, построенной по результатам НЛС (справа)

**Figure 3.** Comparison of the 3D model constructed from design documentation (left) and the model built from TLS data (right)

По итогам разработки ЦИИРМ установлено, что достаточность и актуальность исходной документации для целей инженерного анализа составляет не более 50 %. Иными словами, половина информации, необходимой для достоверной оценки состояния объекта, в традиционной документации отсутствует или недостоверна. Этот вывод, сделанный применительно к задачам вывода из эксплуатации давно работавшего объекта, применим и к задачам ПНР на строящихся АЭС: расхождение между проектной документацией и фактически смонтированным оборудованием возникает в процессе строительства, существует на момент начала ПНР и сохраняется на всем протяжении жизненного цикла станции.

Таким образом, опыт НВАЭС методологически дополняет опыт Ростовской АЭС. Если Ростовская АЭС показала, что НЛС применим в условиях продолжающегося

строительства и позволяет восстановить информационную модель, то НВАЭС дает количественную оценку того, насколько документация расходится с реальностью и к каким последствиям это расхождение приводит при инженерном анализе. Следующий шаг – применение НЛС для решения конкретной расчетной задачи непосредственно в ходе ПНР – был сделан при работах на БелАЭС.

### Опыт применения НЛС на Белорусской АЭС

При вводе в эксплуатацию энергоблока № 2 БелАЭС на подэтапах «испытания и опробования оборудования» и «холодно-горячая обкатка реакторной установки» [6] персоналом АО «Атомтехэнерго» был выполнен значительный объем работ по применению технологии НЛС к задачам подтверждения устойчивости оборудования си-

стем, важных для безопасности, к сейсмическим воздействиям [7]. В рамках этих работ было выполнено сканирование помещений и оборудования здания паровой камеры 20UJE, здания безопасности 20UKD и обстройки 20УКА.

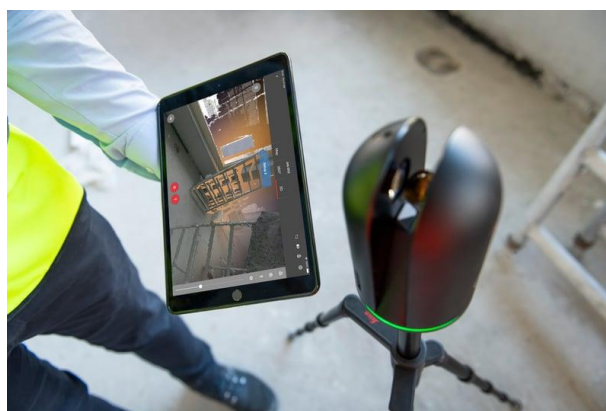
Наиболее показательным примером стала работа по обоснованию сейсмостойкости рециркуляционной охлаждающей установки 20KLG11, находящейся в помещении 20UKD. Для построения адекватной расчетной конечно-элементной модели требовалось внести в имеющуюся проектную документацию данные о фактическом положении и конструкции элементов крепления установки после монтажа, так как без достоверной информации о конфигурации узлов крепления невозможно корректно задать граничные условия в расчетной модели.

Некорректная постановка граничных условий приводит к недостоверным результатам расчета – в данном случае к неверной оценке сейсмостойкости. Альтернативой сканированию в этой ситуации было либо длительное комиссионное обследование установки, либо введение консервативных (завышенных) допущений о жесткости крепления, что могло привести к неудовлетворительному результату расчета.

На БелАЭС использовался компактный трехмерный сканер Leica BLK360 в комплекте с планшетным компьютером Apple iPad Pro (рис. 4) и программным обеспечением Leica Cyclone FIELD 360 для управления съемкой непосредственно на объекте. Точность определения координат зависит от типа прибора, расстояния до объекта и условий съемки. Для приборов класса Leica BLK360 паспортная точность составляет 4-7 мм на расстоянии до 20 метров. Для задач, связанных с верификацией положения крупного оборудования и его крепежных элементов, такая точность является достаточной. Камеральная обработка – объединение результатов отдельных станций в единое облако точек, привязка к системе координат и экспорт данных – выполнялась в программе Leica Cyclone REGISTER 360. Для дальнейшей работы с облаком точек использовался программный комплекс ReClouds, обеспечива-

ющий возможность построения трехмерных моделей по данным сканирования.

Сканер Leica BLK360 позволяет работать как в полной темноте, так и при ярком освещении; диапазон рабочих температур составляет от +5 до +40 °С. Прибор допускает выполнение сферического панорамного фотографирования и термографической съемки. Скорость сканирования – 360 000 точек в секунду, что при типовых настройках детализации обеспечивает время одного сканирования порядка 7-10 минут.



**Рисунок 4.** Лазерный сканер Leica BLK360 в комплекте с планшетом Apple iPad Pro (первоисточник: Leica Geosystems)<sup>3</sup>

**Figure 4.** Leica BLK360 laser scanner with Apple iPad Pro tablet (original: Leica Geosystems)<sup>3</sup>

Помещение здания 20UKD с рассматриваемой установкой было отсканировано с 57 станций. Время сканирования одной станции – от 7 минут. При использовании штатного комплекта аккумуляторов реальная производительность составила от 10 до 20 станций в день, что соответствует полевому этапу продолжительностью 3-6 дней. Сшивка облака точек (объединение результатов всех 57 станций в единое облако в общей системе координат, рис. 5) заняла около одного рабочего дня.

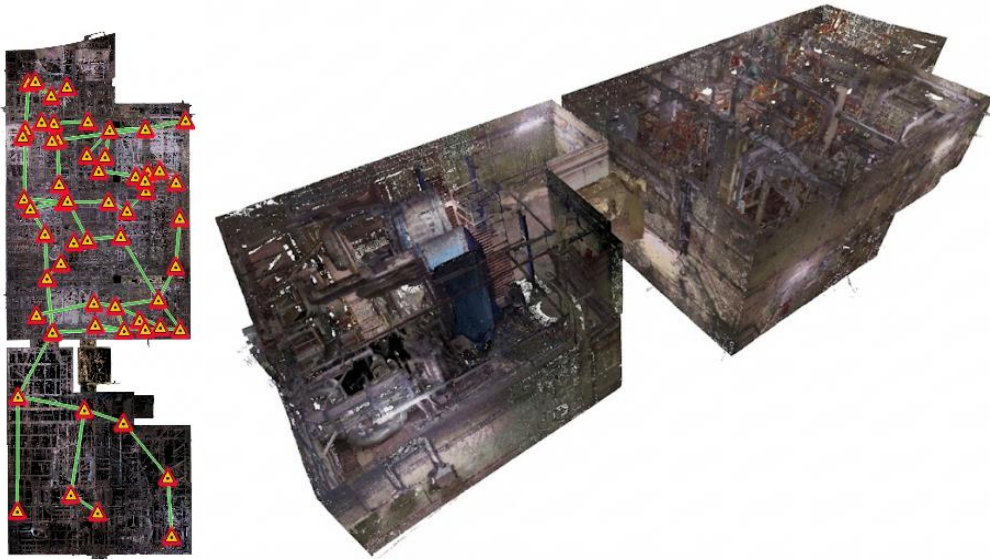
Полученное облако точек содержало детальное трехмерное изображение всего помещения, включая саму установку 20KLG11, все элементы ее крепления к строительным конструкциям, прилегающие трубопроводы и кабельные трассы. Из облака точек были

<sup>3</sup> Первоисточник: Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/> (дата обращения: 26.03.2026).

извлечены трехмерные изображения оборудования (рис. 6), позволившие однозначно идентифицировать тип, количество и геометрию крепежных элементов.

На основе данных, извлеченных из облака точек, была построена актуальная конечно-

элементная модель установки 20KLG11 в программном комплексе ANSYS (рис. 7). Модель учитывала фактическую конфигурацию крепления, а не принятые в проектной документации упрощения.



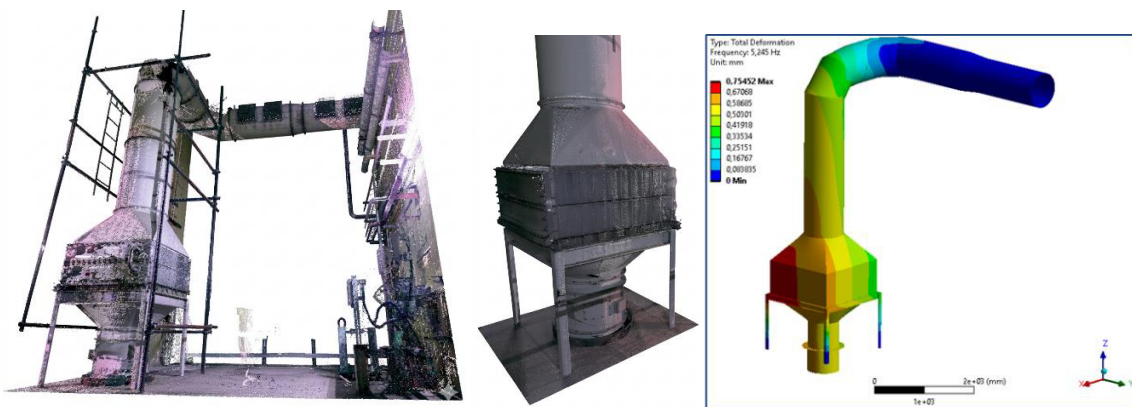
**Рисунок 5.** Помещение здания 20UKD энергоблока № 2 Белорусской АЭС. Сшивка результатов сканирования 57 станций

**Figure 5.** Building 20UKD room, Unit No. 2 of Belarusian NPP. Registration of 57 scanning stations results



**Рисунок 6.** Трехмерное изображение оборудования, полученное из облака точек

**Figure 6.** Three-dimensional image of equipment extracted from the point cloud



**Рисунок 7.** Расчетная конечно-элементная модель установки 20KLG11AN/AC002, построенная по данным лазерного сканирования, и результаты анализа деформаций

**Figure 7.** Finite element model of unit 20KLG11AN/AC002 built according to the laser scanning data, and deformation analysis results

Проведенный модальный анализ позволил определить собственную частоту колебаний установки, которая составила 5,245 Гц, что соответствует результатам натурных динамических испытаний. Дополнительно был выполнен анализ полных деформаций при сейсмическом воздействии. Результаты расчета подтвердили сейсмостойкость установки в соответствии с нормативными требованиями.

Принципиально важным является следующее: данный результат был получен без задержки графика пусконаладочных работ. Сканирование как бесконтактный и быстрый метод не потребовало остановки или ограничения других работ в помещении. Камеральная обработка и расчет были выполнены дистанционно, без повторных выходов в помещение.

Сопоставление трех описанных случаев применения НЛС позволяет выделить три принципиально разных способа использования данной технологии на ядерных объектах.

На Ростовской АЭС облако точек использовалось как исходный материал для создания полной векторной (твердотельной) модели объекта. Это трудоемкий путь (23 человеко-дня только на моделирование), дающий на выходе полноценную трехмерную модель фактического состояния объекта. Такой подход оправдан, когда требуется систематическая работа с моделью на протяжении длительного времени.

На БелАЭС облако точек использовалось напрямую – как источник геометрических данных для конкретного инженерного расчета. Полная твердотельная модель не создавалась; из облака извлекались лишь те параметры, которые требовались для задачи обоснования сейсмостойкости. Этот путь существенно менее трудоемок и позволяет получить практический инженерный результат в сжатые сроки.

На НВАЭС результаты лазерного сканирования использовались для систематической верификации всей имевшейся документации и выявления ее полноты. Итогом стала ЦИИРМ – комплексная модель, объединяющая инженерные и радиационные данные.

Этот подход наиболее трудоемок из трех, поскольку предполагает полное переосмысление и перестройку документальной базы объекта, однако дает наиболее исчерпывающую информационную основу для последующих этапов жизненного цикла. Выбор между тремя подходами определяется постановкой задачи. Если требуется исчерпывающая документация фактического состояния – необходима полная векторная или ЦИИРМ-модель. Если задача конкретна и ограничена (например, обоснование сейсмостойкости одной установки) – достаточно прямого использования облака точек. Это существенно влияет на трудоемкость и стоимость работ.

Облако точек, созданное при ПНР, не исчерпывает своей ценности после решения исходной задачи. Оно фиксирует состояние объекта на конкретный момент времени с высокой степенью детализации и полноты. В дальнейшем к нему можно обращаться для получения любых геометрических данных об объекте в том состоянии, в каком он был на момент съемки.

Это принципиально отличает облако точек от традиционной исполнительной документации: если при ручных обмерах фиксируются лишь те параметры, которые были предусмотрены программой обследования, то облако точек содержит трехмерные координаты всех видимых поверхностей. Любой вопрос о геометрии объекта, который может возникнуть впоследствии, уже имеет ответ в облаке точек – при условии, что соответствующая поверхность была видна хотя бы с одной станции сканирования.

### **Направления применения технологии НЛС в рамках ПНР**

Возможными направлениями применения технологии НЛС в рамках ПНР являются:

– предварительный визуальный осмотр помещений и оборудования. Панорамные изображения и облако точек, создаваемые сканером одновременно, позволяют провести детальный «виртуальный обход» помещения без физического присутствия в нем. Специалист может предварительно изучить состояние оборудования на экране компью-

тера, выявить очевидные несоответствия и сформулировать конкретные вопросы, требующие натурного осмотра, и лишь после этого целенаправленно выйти в помещение только к выявленным проблемным местам. Это сокращает время пребывания персонала в помещении и повышает эффективность осмотров;

– верификация опорно-подвесных систем трубопроводов. Фактическое положение и конструкция элементов крепления трубопроводов могут быть определены по данным облака точек и сопоставлены с проектными данными. Это позволяет выявлять отклонения, значимые для расчетов на сейсмические и динамические нагрузки;

– проверка зазоров. Расстояния между оборудованием, трубопроводами и строительными конструкциями, в том числе нормируемые антисейсмические зазоры, могут быть измерены по облаку точек с точностью, сопоставимой с точностью натурных замеров;

– обоснование сейсмостойкости оборудования. Как показал опыт БелАЭС, данные НЛС позволяют построить адекватную расчетную модель в тех случаях, когда проектная документация не содержит достаточных сведений о фактическом раскреплении оборудования;

– документирование состояния на момент приемки. Облако точек, созданное при ПНР, фиксирует исходное состояние объекта, от которого в дальнейшем можно отсчитывать любые изменения, будь то деформации, смещения оборудования или результаты модернизаций.

– подготовка к сдаточным испытаниям. Перед проведением испытаний, требующих натурного осмотра оборудования комиссиями, виртуальный тур по облаку точек позволяет подготовить перечень вопросов, требующих уточнения, и спланировать маршруты осмотра.

### **Возможное применение облака точек в ходе промышленной эксплуатации:**

– Плановые осмотры оборудования. Многие процедуры по техническому обслуживанию и надзору за состоянием оборудования предусматривают обязательный визуальный осмотр. Предварительное изучение

объекта по облаку точек позволяет сосредоточить внимание обходчика на конкретных элементах, вызывающих сомнения, и избежать избыточного времени пребывания в помещении.

– Подготовка к ремонту. При планировании ремонтных работ облако точек позволяет дистанционно уточнить геометрию рабочей зоны, подобрать необходимое оборудование и инструменты, спланировать маршруты доставки материалов. Это сокращает время подготовки и снижает риск непредвиденных затруднений при производстве работ.

– Проектирование модернизаций. При разработке проектов модернизации действующего оборудования облако точек служит актуальной геометрической основой, отражающей реальное, а не проектное состояние объекта. Это особенно важно для объектов, претерпевших существенные изменения в ходе эксплуатации.

– Мониторинг состояния строительных конструкций. Повторное сканирование через определенные интервалы времени позволяет выявлять деформации и смещения конструкций путем сравнения облаков точек, созданных в разное время.

– Поддержка расследования нештатных ситуаций. При возникновении нештатных ситуаций облако точек, созданное до их возникновения, может служить эталоном для оценки возможных изменений в состоянии оборудования или конструкций.

– Обучение персонала. Виртуальные туры по помещениям станции, созданные на основе панорамных изображений и облака точек, могут использоваться для подготовки персонала без необходимости физического присутствия на объекте.

– Дистанционные консультации специалистов. Облако точек и панорамные изображения позволяют специалистам конструкторских организаций проводить техническую экспертизу дистанционно – без командирования на объект. Вопрос, на проработку которого ранее требовалась организация выезда специалиста, может быть решен в ходе видеоконференции с демонстрацией трехмерной модели.

Таким образом, однажды созданное обла-

ко точек становится долгосрочным информационным активом, окупаемость которого растет по мере его использования для решения новых задач.

### **Условия рационального применения НЛС**

Опыт работ на Ростовской АЭС, НВАЭС и БелАЭС позволяет сформулировать условия, при которых применение НЛС является оправданным и эффективным:

- когда проектная документация не содержит достаточных данных о фактическом состоянии смонтированного оборудования для решения конкретной расчетной задачи (как в случае обоснования сейсмостойкости на БелАЭС);

- когда требуется верификация соответствия фактического состояния объекта проектной модели в рамках управления конфигурацией;

- когда необходимо создать геометрическую основу для проектирования модернизации или реконструкции;

- когда традиционные ручные обмеры технически затруднены из-за стесненности пространства, высотности объектов или их недоступности;

- когда требуется документирование состояния объекта на определенный момент времени с высокой детализацией и полнотой.

### **Возможные ограничения метода НЛС**

Ограничения использования метода НЛС могут быть связаны со стоимостью оборудования, трудоемкостью камеральной обработки, требованиями к квалификации персонала и ограничениями конкретного прибора по условиям съемки:

- Профессиональные лазерные сканеры относятся к дорогостоящему измерительному оборудованию. Сканер Leica BLK360, применявшийся на БелАЭС, относится к одному из наиболее доступных приборов своего класса, однако его стоимость тем не менее существенна. Приборы более высокого класса, такие как Leica ScanStation P20, использовавшиеся на Ростовской АЭС, стоят значительно дороже. Важно также учитывать, что стоимость оборудования не исчерпывает общих затрат на применение технологии: необходимо программное обеспечение для

обработки данных и расчетные мощности для работы с большими массивами данных.

- Как показал опыт Ростовской АЭС, создание полной векторной модели из облака точек является трудоемким процессом (23 человеко-дня для одного здания). Современное программное обеспечение предоставляет инструменты автоматического распознавания геометрических примитивов, однако моделирование остается преимущественно ручной работой. Этот факт необходимо учитывать при планировании сроков и бюджета.

- Как полевые работы по сканированию, так и камеральная обработка требуют специально подготовленных специалистов. Освоение современного программного обеспечения для работы с облаками точек требует времени и практики. Для организаций, не имеющих в штате таких специалистов, целесообразным может быть привлечение специализированного подрядчика.

- Применявшийся на БелАЭС сканер Leica BLK360 допускает работу только при температуре не ниже +5 °С и не допускает наличия высокого уровня запыленности. Для работ на открытом воздухе или в неотапливаемых помещениях в зимних условиях могут потребоваться приборы с расширенным температурным диапазоном.

Принципиально важно, что методология применения НЛС, описанная в настоящей работе, не привязана к конкретной марке оборудования: требования к съемке определяются характером инженерной задачи, а не производителем прибора. При выборе оборудования ключевым критерием является соответствие паспортной точности сканера допустимым погрешностям конкретной расчетной задачи, а также технические ограничения применяемого прибора по условиям съемки.

### **Перспективы применения на АЭС «Аккую»**

АЭС «Аккую» сооружается по тому же проекту ВВЭР-1200, что и энергоблок № 2 БелАЭС, на котором был получен описанный выше опыт применения НЛС. Это означает, что инженерные задачи, возникающие при ПНР, будут в значительной мере аналогичны тем, что решались на БелАЭС.

В частности, при вводе в эксплуатацию энергоблоков АЭС «Аккую» потребуется подтверждение сейсмостойкости оборудования систем, важных для безопасности. Сейсмические условия площадки АЭС «Аккую» характеризуются более высокими расчетными ускорениями по сравнению с площадкой БелАЭС, что придает задачам обоснования сейсмической безопасности повышенную значимость. Опыт применения НЛС для обоснования сейсмостойкости, полученный на БелАЭС, непосредственно применим к аналогичным задачам на АЭС «Аккую». Важным преимуществом является то, что необходимое оборудование и компетенции уже существуют. Применение НЛС при ПНР на АЭС «Аккую» может представлять собой тиражирование уже апробированного подхода на объект с аналогичными инженерными задачами.

Целесообразно рассмотреть возможность планового применения НЛС на тех этапах ПНР, которые предполагают обоснование сейсмостойкости оборудования: накопленный опыт показывает, что в ряде случаев проектная документация не содержит достаточных данных для корректной постановки расчетной задачи, и НЛС является наиболее эффективным способом восполнить этот пробел.

При проведении обязательных комиссионных осмотров помещений и оборудования предварительное ознакомление с объектом по данным сканирования позволяет повысить качество подготовки к осмотру и сократить его продолжительность.

Вопросы организации работ – выбор между выполнением сканирования собственными силами или с привлечением подрядчика, требуют отдельной проработки с учетом конкретных условий объекта.

## **Заключение**

1. НЛС является эффективным инструментом для решения конкретного класса инженерных задач: получения достоверных геометрических данных о фактическом состоянии объекта тогда, когда эти данные не могут быть извлечены из существующей документации.

2. Рассмотренный опыт трех объектов подтверждает это с разных сторон. Опыт НВАЭС показывает, что недостоверность традиционной документации действующего объекта может достигать 50 %; расхождение фактического и документального состояния системно и значительно. Опыт Ростовской АЭС показывает, что НЛС применим в условиях продолжающегося строительства и позволяет зафиксировать фактическое состояние объекта в сжатые сроки при минимальном вмешательстве в производственный процесс. Опыт БелАЭС демонстрирует, что данные сканирования могут быть непосредственно использованы для решения конкретной инженерной расчетной задачи – подтверждения сейсмостойкости – без создания полной твердотельной модели, что существенно сокращает трудоемкость и позволяет получить результат в рамках графика ПНР.

3. Полевая часть работ (собственно сканирование) во всех рассмотренных случаях характеризовалась высокой производительностью и минимальным влиянием на производственные процессы на объекте. Основная трудоемкость сосредоточена в камеральной обработке и определяется конечной целью: прямое использование облака точек для локальных измерений и построения расчетных моделей (БелАЭС) существенно менее трудоемко, чем создание полной векторной модели (Ростовская АЭС) или комплексной ЦИИРМ с радиационными атрибутами (НВАЭС).

4. Облако точек, созданное однажды, является долгосрочным информационным активом, применимым для широкого круга задач: от предварительного визуального осмотра и верификации проектных данных до планирования ремонтов, проектирования модернизаций и обучения персонала. Это обстоятельство существенно влияет на оценку эффективности затрат на проведение работ.

5. Применение НЛС при ПНР АЭС «Аккую» представляется целесообразным прежде всего для задач обоснования сейсмостойкости оборудования – по аналогии с опытом БелАЭС. Имеющиеся компетенции и оборудование позволяют рассматривать это как тиражирование апробированного подхода, а не внедрение новой технологии.

При этом опыт НВАЭС служит дополнительным обоснованием: он показывает, что расхождение между проектной документацией и реальным состоянием смонтированного

оборудования является закономерностью, а не исключением, и НЛС остается наиболее надежным способом его устранения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Morgan J., Mostafiz R.B., Friedland C. Development of a decision support tool for use of 3D terrestrial laser scanning for piping designs. *Frontiers in Built Environment*. 2025;11:1663869. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1663869>
2. Margaronis A., Tsoumas N., Georgantzoglou A., et al. Three-Dimensional Scanning-Based Retrofitting of Ballast Water Treatment Systems for Enhanced Marine Environmental Protection. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026;14(2):154. <https://doi.org/10.3390/jmse14020154>
3. Zhong Z., Gu D., Dong X., Kong Q. 3D laser scanning technique and its application in China nuclear power plants. Proceedings of the 27th International Conference on Nuclear Engineering. *The Japan Society of Mechanical Engineers*, 2019. Session 1593. <https://doi.org/10.1299/jsmeicone.2019.27.1593>
4. Kirilak N. et al. Development and implementation of technical decision for digital support of construction using photogrammetry methods. *Nuclear Engineering and Design*. 2021;381:111366. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111366>
5. Shin J., Song J. Dismantling quantity estimation for nuclear power plant: scan-to-BIM versus conventional method. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024;28(5):1607-1621. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-0675-6>
6. Сааков Э.С., Рясный С.И. Ввод в эксплуатацию энергоблоков АЭС. Москва: Энергоатомиздат, 2007. 496 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_003388718/?ysclid=mor7w2jmlb207883739](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003388718/?ysclid=mor7w2jmlb207883739) (дата обращения: 26.03.2026).
7. Saakov E.S., Ryasny S.I. Commissioning of NPP power units. Moscow, Energoatomizdat, 2007. 496 p. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_003388718/?ysclid=mor7w2jmlb207883739](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003388718/?ysclid=mor7w2jmlb207883739) (accessed: 26.03.2026).
8. Сааков Э.С., Рясный С.И., Зайкин И.И. и др. Повышение эффективности расчетно-экспериментальной оценки сейсмостойкости оборудования АЭС с применением базы данных. *Атомная энергия*. 2015;118(3):137-141. Режим доступа: [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t118-3\\_2015/p140/?ysclid=mor83c2iqj618476114](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t118-3_2015/p140/?ysclid=mor83c2iqj618476114) (дата обращения: 26.03.2026).
9. Saakov E.S., Ryasny S.I., Zaikin I.I. et al. Improving the efficiency of computational and experimental assessment of seismic resistance of NPP equipment using a database. *Atomic Energy*, 2015;118(3):137-141. (In Russ.). Available at: [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t118-3\\_2015/p140/?ysclid=mor83c2iqj618476114](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t118-3_2015/p140/?ysclid=mor83c2iqj618476114) (accessed: 26.03.2026).

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Зайкин И.И.** – замысел и дизайн исследования в рамках работы в АО «Атомтехэнерго» на Белорусской АЭС, в том числе внедрение идеологии лазерного 3D сканирования в программы динамических испытаний оборудования, сбор и интерпретация публикаций по теме работы, подготовка текста статьи;

**Рясный С.И.** – критический пересмотр вариантов статьи в части значимого интеллектуального содержания, подготовка окончательного варианта статьи для опубликования;

**Булахтин К.В.** – руководство и разработка технологии лазерного 3D сканирования оборудования на Белорусской АЭС, обработка данных, построение облаков точек и конечно-элементных моделей оборудования, проведение модального анализа и анализа сейсмостойкости;

**Щугорев А.В.** – участие в разработке и внедрении идеологии лазерного 3D сканирования в программы ПНР Белорусской АЭС;

**Валеев Р.Ш.** – участие во внедрении идеологии лазерного 3D сканирования в программы ПНР в период работы на Белорусской АЭС, участие в подготовке текста статьи;

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Zaykin I.I.** – the idea and design of the research in the framework of work at Atomtekhenergo JSC at the Belarusian NPP, including the introduction of 3D laser scanning ideology into dynamic equipment testing programs, collection and interpretation of publications on the topic of the work, preparation of the text of the article;

**Ryasny S.I.** – critical revision of the versions of the article in terms of significant intellectual content, preparation of the final version of the article for publication;

**Bulakhtin K.V.** – management and development of 3D laser scanning technology for equipment at the Belarusian NPP, data processing, building point clouds and finite element models of equipment, conducting modal analysis and earthquake resistance analysis;

**Shchugorev A.V.** – participation in the development and implementation of 3D laser scanning ideology in the programs of the Belarusian NPP;

**Valeev R.Sh.** – participation in the introduction of 3D laser scanning ideology into the programs of the Belarusian NPP during the period of work at the Belarusian NPP, participation in the preparation of the text of the article;

**Карпенко Н.А.** – участие в подготовке текста статьи.

**ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:**

Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования

**БЛАГОДАРНОСТИ:**

Авторы выражают признательность специалистам Белорусской АЭС за техническое сопровождение и организационное обеспечение работ, в том числе при получении необходимых разрешений и согласований на допуск оборудования и персонала в помещения станции.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Иван Игоревич Зайкин**, кандидат технических наук, эксперт, АО «Аккую Нуклеар», Гюльнар, Мерсин, Турецкая Республика.

e-mail: zaykin@hotmail.com

**Сергей Иванович Рясный**, доктор технических наук, профессор, НИУ «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: esp.izmailovo@mail.ru

**Константин Васильевич Булахтин**, начальник отдела сейсмической безопасности, АО «Атомтехэнерго», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: kovbulakhtin@atech.ru

**Алексей Владимирович Щугорев**, кандидат технических наук, начальник управления диагностики, сейсмической безопасности и расчетного анализа, АО «Атомтехэнерго», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: MGP@atech.ru

**Ринат Шамильевич Валеев**, заместитель технического директора по радиационной защите и обращению с радиоактивными отходами, АО «Аккую Нуклеар», Гюльнар, Мерсин, Турецкая Республика.

e-mail: info@akkuyu.com

**Николай Андреевич Карпенко**, начальник отдела надежности и анализа безопасности РУП «Белорусская АЭС», Республика Беларусь.

e-mail: karpenko89@gmail.com

**Karpenko N.A.** – participation in the preparation of the text of the article.

**FUNDING:**

The authors declare no external funding

**ACKNOWLEDGEMENTS:**

The authors express their gratitude to the specialists of the Belarusian NPP for the technical support and organizational support of the work, including in obtaining the necessary permits and approvals for the admission of equipment and personnel to the plant.

**CONFLICT OF INTEREST:**

The authors declare no conflict of interest.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:**

**Ivan I. Zaykin**, Cand. Sci. (Engin), expert, Akkuyu Nuclear JSC, Gulnar, Mersin, Republic of Turkey.

e-mail: zaykin@hotmail.com

**Sergey I. Ryasny**, Dr. Sci. (Engin), Professor, National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation.

e-mail: esp.izmailovo@mail.ru

**Konstantin V. Bulakhtin**, Head of the Seismic Safety Department, Atomtechenergo JSC, Moscow, Russian Federation.

e-mail: kovbulakhtin@atech.ru

**Aleksey V. Shchugorev**, Cand. Sci. (Engin), head of the Diagnostics, Seismic Safety, and Computational Analysis Department, Atomtechenergo JSC, Moscow, Russian Federation.

e-mail: MGP@atech.ru

**Rinat Sh. Valeev**, Deputy Technical Director for Radiation Protection and Radioactive Waste Management, Akkuyu Nuclear JSC, Gulnar, Mersin, Republic of Turkey.

e-mail: info@akkuyu.com

**Nikolai Andreevich Karpenko**, Head of the Reliability and Safety Analysis Department, SUE «Belarusian NPP», Republic of Belarus.

e-mail: karpenko89@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 27.03.2026

После доработки / Revision 15.05.2026

Принята к публикации / Accepted 19.05.2026