

**ОПТИМИЗАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

УДК 004.9

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА  
И АНАЛИЗА ДАННЫХ ТОЛЩИНОМЕТРИИ**

**В.В. Косякин<sup>1,2</sup>, В.П. Хранилов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*ЛУКОЙЛ-Инженерные Навыки и Компетенции, Россия, Нижний Новгород, Vladimir.Kosyakin@lukoil.com*

<sup>2</sup>*Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,  
Россия, Нижний Новгород, hranilov@nntu.ru*

*Аннотация.* Представлена разработанная цифровая система, предназначенная для мониторинга трубопроводного оборудования на нефтеперерабатывающих предприятиях. Она позволяет устранить ключевые недостатки традиционных методов ультразвуковой толщинометрии. Система включает мобильное приложение для автоматизированного сбора данных на основе QR/NFC-меток, работающую в условиях нестабильного интернет-соединения и серверную платформу для их анализа. Она обеспечивает точное позиционирование точек измерения, автоматическую проверку данных по заданным алгоритмам и интеграцию с системами RBI. Результаты промышленных испытаний показали, что время диагностики сокращается на 20% и повышается качество измеренных данных. Разработанное решение создает основу для внедрения предиктивной аналитики в процессы мониторинга оборудования, что открывает новые горизонты для нефтегазовой отрасли.

*Ключевые слова:* ультразвуковая толщинометрия, цифровой мониторинг, мобильные технологии.

**AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING AND ANALYZING THICKNESS  
MEASUREMENT DATA**

**V.V. Kosyakin<sup>1,2</sup>, V.P. Hranilov**

<sup>1</sup>*LUKOIL Engineering Skills and Competences, Russia, Nizhny Novgorod, Vladimir.Kosyakin@lukoil.com*

<sup>2</sup>*R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Russia, Nizhny Novgorod, hranilov@nntu.ru*

*Abstract.* The developed digital system designed for monitoring pipeline equipment at oil refineries is presented. It makes it possible to eliminate the key disadvantages of traditional ultrasonic thickness measurement methods. The system includes a mobile application for automated data collection using QR/NFC tags, operating in conditions of unstable Internet connection, and a server platform for their analysis. It provides accurate positioning of measurement points, automatic data verification using preset algorithms, and integration with RBI systems. The results of industrial tests have shown that the diagnostic time is reduced by 20% and the quality of the measured data is improved. The developed solution creates the basis for the implementation of predictive analytics in equipment monitoring processes, which opens up new horizons for the oil and gas industry.

*Keywords:* ultrasonic thickness measurement, digital monitoring, mobile technologies.

**Для цитирования:** Косякин В.В., Хранилов В.П. Автоматизированная система мониторинга и анализа данных толщинометрии // Математические методы в технологиях и технике. 2025. № 6. С. 13-18.

**Введение.** Современные нефтеперерабатывающие предприятия требуют структурированного подхода к мониторингу трубопроводов, где ключевые операции: сбор данных, их анализ и интеграция в процессы принятия решений должны объединяться в единый комплекс мероприятий. Это позволяет заранее выявлять участки системы, подверженные эрозии и коррозии, которые приводят к локальному истончению стенок, образованию трещин и утечкам. Несмотря на применение ультразвуковой толщинометрии (УЗТ) [1] и риск-ориентированного контроля (RBI), существующие методы имеют ограничения, которые увеличивают сроки принятия решений, а также могут привести к несвоевременному выявлению критически изношенных участков. Это, в свою очередь, создает риск аварийных ситуаций и внеплановых остановок производства [2].

В современных условиях нефтеперерабатывающая отрасль активно внедряет инновационные технологии для повышения эффективности мониторинга и

прогнозирования технического состояния оборудования. В частности, анализ исторических данных используется для внесения изменений в конструкцию промышленных систем еще на этапе проектирования [3]. Кроме этого, для моделирования различных режимов работы и оценки потенциальных последствий применяются цифровые двойники, основанные на моделях машинного обучения, обученных на данных о работе установок [4]. Однако успешность таких решений во многом зависит от качества исходной информации: неполные, неточные или несогласованные измерения снижают достоверность аналитических выводов и точность прогнозных моделей. Внедрение алгоритмов предиктивной аналитики требует тщательной подготовки данных, т.к. их качество непосредственно влияет на процесс обучения систем искусственного интеллекта и корректность последующих решений. В этом контексте структурирование эксплуатационных параметров и истории работы оборудования в единые цифровые модули играет ключевую роль, позволяя минимизировать риски несвоевременных ремонтов и оптимизировать управление ресурсами.

Для повышения точности измерений и минимизации факторов, влияющих на качество результатов, получаемых в процессе УЗТ и последующего риск-ориентированного контроля, проведено комплексное исследование процессов сбора и обработки данных. В результате и выявлены основные проблемы, которые приводят к временным задержкам и повышенным затратам на повторные измерения:

- формат сбора данных – первичная информация фиксируется на бумажном носителе, а затем переносится в электронный формат; это создает задержки в процессе обработки и анализа данных;
- несвоевременное обнаружение некорректных измерений: при анализе выявляются измерения, не соответствующие допускам, что требует повторного выхода на объект для проведения подтверждающих измерений;
- отсутствие автоматизации: неавтоматизированный процесс передачи данных и повторных проверок увеличивает временные затраты и задерживает принятие решений.

В совокупности эти факторы приводят к значительным потерям времени на этапе от первичного измерения до принятия решения о замене участков системы. В условиях жестких сроков проведения капитального ремонта (КР) это может вызвать серьезные экономические и экологические последствия.

**Описание системы автоматизации процесса.** После проведенного анализа принято решение о разработке системы автоматизации процесса. Одним из ключевых элементов системы является мобильное приложение «МОБИТЕХ» [5].

Разработка системы осуществлена с применением современных технологий, обеспечивающих ее надежность и масштабируемость, схематичное представление предложенного решения приведено на рис. 1.:

- мобильное приложение разработано на кроссплатформенном фреймворке NET MAUI, что позволяет использовать его на устройствах с iOS, Android, Linux и Windows без потери функциональности;
- серверная часть реализована на платформе ASP.NET Core, обеспечивающей высокую скорость обработки запросов и поддержку промышленных протоколов.;
- база данных развернута на PostgreSQL, что обусловлено ее устойчивостью к высоким нагрузкам и поддержкой геопространственных

Для повышения качества измерений мобильное приложение выполняет проверку данных по ключевым формулам, включая расчет скорости коррозии, прогнозирование даты достижения отбраковочной величины и определение критических точек, требующих особого внимания, что представлено на рис. 2 а. Это позволяет фильтровать неточные измерения до их передачи на сервер и своевременно уведомлять о необходимости замены выявленных участков.

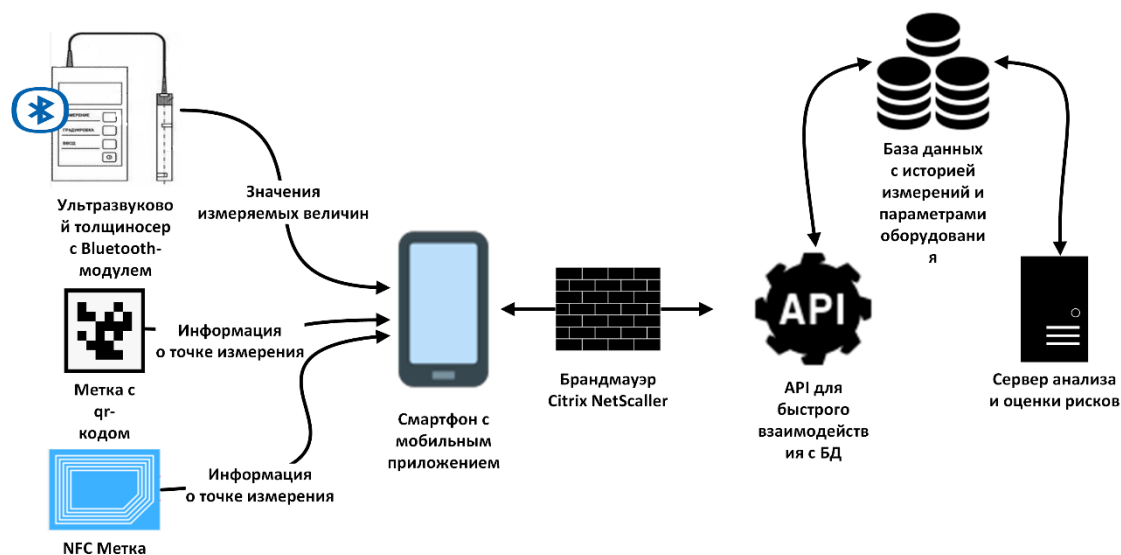


Рис. 1. Архитектура системы: метки, толщиномер, мобильное приложение, брандмауэр, БД, сервер, API

В условиях нефтеперерабатывающих заводов, где из-за большого количества металлоконструкций отсутствует стабильное Интернет-соединение, приложение поддерживает оффлайн-режим, что продемонстрировано на рис. 2 б. Вычисления выполняются непосредственно на клиентском устройстве, а реализованная фоновая синхронизация накопленных запросов позволяет обеспечить бесперебойность измерений даже при отсутствии связи. В случае отклонения значений от допустимых пределов предлагается повторное измерение, а при подтверждении измерений, находящихся в критических диапазонах, система автоматически направляет уведомление в ответственный отдел.

Проверка результатов измерений и определение приоритетных точек рассчитывается по формулам (1)–(3):

$$D_{crit} = D_0 + (D_k - D_0)(S_0 - S_{crit}) / (S_0 - S_k), \quad (1)$$

где  $D_{crit}$  – дата достижения предельного значения,  $D_0$  – дата измерения номинального значения,  $D_k$  – дата последнего измерения,  $S_0$  – начальная толщина стенки оборудования,  $S_{crit}$  – предельная толщина стенки трубопровода,  $S_k$  – толщина стенки трубопровода на дату последнего измерения.

$$V_{corrosion} = (S_k - S_0) / (D_k - D_0), \quad (2)$$

где  $V_{corrosion}$  – скорость коррозии.

$$S_{max} = S_0 \cdot a, \quad (3)$$

где  $S_{max}$  – максимально допустимое значение толщины с учетом прироста, где  $a$  – коэффициент, изменяющийся в зависимости от номинальной толщины стенки оборудования.

Для точного позиционирования измерений применяются метки: каждой точке присваивается уникальный QR-код или NFC-метка. При их считывании мобильное приложение идентифицирует соответствующую точку на интерактивной электронной схеме оборудования. Интерфейс приложения позволяет быстро переходить к измерению, сопоставлять точку с электронной схемой и упрощает ее поиск, что представлено на рис. 2в.

В первой версии приложения данные вводятся вручную, однако в перспективе планируется их автоматизированное заполнение на основе Bluetooth-соединения с измерительным прибором.

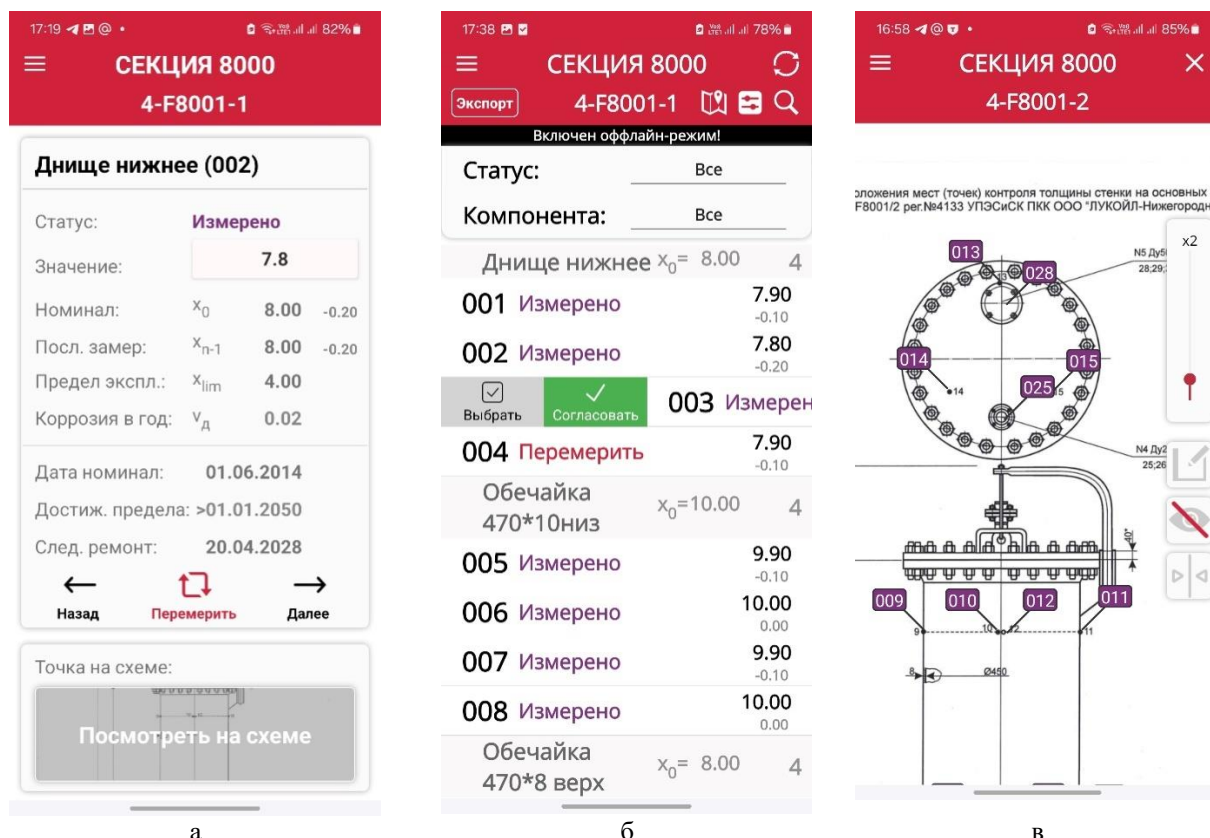


Рис. 2. Визуализация интерфейса измерения и обработки данных в мобильном приложении

Для проверки работоспособности предложенного проекта проведено два опытно-промышленных испытания: первые – в период весенних КР 2024 года, а вторые – во время осенних. Весенние испытания проводились на промышленном объекте УПИОНБ при участии сотрудников технического надзора и разработчиков системы из ООО «ЛИНК». Цель данных испытаний – выявление узких мест системы, для их последующего устранения [6]. Первый этап включал рекогносцировку промышленной площадки технологической установки УПИОНБ, осмотр оборудования и определение порядка выполнения толщинометрии. Также определены места для прикрепления меток с QR-кодами.

Второй этап предполагал проведение замеров толщинометрии на окислительной колонне и емкости битума с использованием мобильного приложения «МОБИТЕХ». В результате среднее время на замер одной точки составило 30 с, а при необходимости произведения повторного измерения – до 45 с.

Кроме того, приложение выявило, что ряд точек на 2 штуцерах окислительной колонны, находящихся вне допустимых значений. Это позволило установить, что данный участок заменен, однако информация об этом не была своевременно внесена на сервер анализа данных.

Третий этап включал измерения точек на трубопроводе масла и газоуравнительной линии товарных емкостей. В этом случае среднее время на занесение данных по одной точке в сечении составило 10 с, а при необходимости подтверждения данных – 25 с.

Приложение перевело 15 точек на газоуравнительной линии товарных емкостей в статус «На отбраковку», так как предварительные расчеты показали, что дата достижения предела наступает раньше даты следующего капитального ремонта. Об этом автоматически направлена информация специалистам технадзора для подготовки актов отбраковки

В результате проведенных испытаний выявлен ряд потенциальных модификаций, способных значительно ускорить процесс внесения данных в мобильное приложение: разработка офлайн режима и реализация группировки внесения данных по сечениям на трубопроводах и штуцерах

Предложенные доработки успешно реализованы и внедрены, что потребовало проверки их эффективности. Для этого решено провести дополнительные испытания в рамках осенних капитальных ремонтов.

Целью опытно-промышленных испытаний во время осенних КР стало самостоятельное проведение ультразвуковой толщинометрии с использованием мобильного приложения силами сотрудников завода без непосредственного участия специалистов ООО «ЛИНК». Во время испытаний принято решения проверить 12 единиц емкостей, отпарную колонну и 4 теплообменника, на которых необходимо измерить 1012 точек.

По результатам опытно-промышленных испытаний проведен анализ скорости занесения измеренных данных в систему. Установлено, что среднее время на измерение одной точки с учетом передвижений по местности составило 20,5 с, а для точек, расположенных поблизости, 12,83 с. Анализ показал, что время, затраченное на проведение полевых работ, сократилось по сравнению с первыми испытаниями. При этом важно отметить, что при использовании мобильного приложения время измерений не увеличилось относительно метода с бумажными носителями, что является положительным эффектом. Кроме того, внедрение приложения позволило полностью исключить этапы, связанные с ручным переносом данных на бумажные носители, их проверкой и подготовкой экспортных файлов для программного обеспечения PCMS.

Внедрение системы автоматизации сбора данных толщинометрии позволило значительно повысить эффективность процессов диагностики и мониторинга состояния оборудования. Исключение многоэтапного ручного ввода данных и их автоматическая обработка способствовали минимизации ошибок, связанных с человеческим фактором, а интеграция с специализированным программным обеспечением сократила время анализа и обеспечила его высокую точность. Особенно важна эта возможность для оборудования, доступного для измерений только во время капитальных ремонтов, т.к. теперь данные поступают к специалистам RBI в режиме реального времени. Использование исторических данных для прогнозирования критических точек позволило оперативно выявлять потенциально уязвимые участки, требующие первоочередного контроля, без необходимости привлечения высококвалифицированных сотрудников для их анализа. В результате снизился риск несвоевременной замены оборудования, что положительно повлияло на срок ремонтов и минимизацию внеплановых остановок производственных процессов.

**Заключение.** Автоматизированная система сбора и обработки данных ультразвуковой толщинометрии продемонстрировала эффективность в опытно-промышленных испытаниях. Реализация алгоритма идентификации приоритетных точек измерения, использование QR-кодов для точного позиционирования, а также встроенные механизмы мгновенной проверки данных позволили сократить время диагностики на 20% и снизить вероятность ошибок.

Кроме оптимизации текущих процессов накопленные и систематизированные датасеты в системе открывают возможности для разработки и обучения предиктивных моделей. Эти модели могут быть использованы для прогнозирования износа оборудования, планирования капитальных ремонтов, а также проектирования новых

технологических установок с учетом эксплуатационных характеристик и исторических данных о деградации материалов.

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение возможностей машинного обучения в области предиктивной диагностики оборудования, включая моделирование скорости коррозии, оценку эксплуатационного ресурса оборудования и автоматизацию процессов принятия решений. Реализация этих шагов станет основой для цифровой трансформации управления инфраструктурой нефтеперерабатывающих предприятий в соответствии с принципами Industry 4.0, способствуя созданию интеллектуальных систем диагностики, повышающих надежность и безопасность технологических процессов.

#### Библиографический список

1. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Методы ультразвуковые. М.:Стандартинформ, 2014. 45 с.
2. API Recommended Practice 580. Risk-Based Inspection. Washington. American Petroleum Institute, 2020. 5 p.
3. Gao X., Zhuang W. Apply Digital-Twin Model to Optimize the Planning of Equipment Pipeline System in the Laboratory Campus // *Phygital Intelligence*. 2023, pp. 260–272.
4. Huang L., Shi X., Shi H., Tang A., Qing G. Intelligent remaining useful life prediction of equipment based on digital twin // *Research Square* [Электронный ресурс]. 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4364776/v1.
5. Косякин В.В., Глухов А.В., Копалиди Е.И. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687646 (РФ).
6. Косякин В.В., Глухов А.В., Копалиди Е.И. и др. Разработка и применение мобильного приложения «МОБИТЕХ» для повышения оперативности и точности оценки показателей толщинометрии статического оборудования // *Химия и технология топлив и масел: научно-технический журнал*. 2024. № 5. С. 20–22.