

Проектирование программно-аппаратного комплекса диагностики температурного поля с помощью теории систем с распределенными параметрами

И. М. Новожилов
Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
novozhilovim@list.ru

А. А. Сидоренко
Санкт-Петербургский горный
университет
andreeva-1910@inbox.ru

Д. Л. Тукеев
Санкт-Петербургский горный
университет
Tukeev_DL@pers.spmu.ru

М. Е. Поткина
Санкт-Петербургский горный
университет
m.losckaya@yandex.ru

Д. А. Первухин
Санкт-Петербургский горный
университет
Pervukhin_DA@pers.spmi.ru

В. Е. Трушников
Санкт-Петербургский горный
университет
Trushnikov_VE@pers.spmi.ru

Аннотация. В рамках данного исследования спроектирована программно-аппаратная платформа для диагностики температурного поля движущегося потока нефти. В качестве предмета исследования выбрана теория систем с распределенными параметрами и теория подобия. В качестве аппаратной части использована технология Arduino и среда разработки программных средств на языке Delphi Embarcadero RAD Studio XE7.

Ключевые слова: идентификация систем, измерения, анализ, датчики, нефть, газ, уголь

I. ВВЕДЕНИЕ

Сырая нефть представляет собой сложную смесь насыщенных углеводородов, ароматических соединений, нафтенов, асфальтенов и смолы. Последние достижения в технологиях разведки и добычи доказали, что глубоководное бурение экономически целесообразно. По мере дальнейшего развития нефтяных скважин в открытом море, проблемы осаждения парафина станут более серьезными и обширными из-за увеличения количества транспортных линий на холодном дне океана. Отложение парафина происходит, когда парафиновые компоненты в сырой нефти осаждаются и откладываются на холодной стенке трубопровода (при снижении температуры до предела растворимости).

Если превентивные методы предотвращения отложения парафина (например, изоляция трубопровода, закачка ингибитора парафина или их комбинация) не дали результата, слой парафинового геля быстро увеличивается в толщине и препятствует потоку нефти. Скребок (твердый предмет, диаметр которого меньше внутреннего диаметра трубы) проходит через трубопровод, чтобы соскоблить парафиновые отложения. Однако метод очистки скребками не может быть эффективно использован без надлежащего прогнозирования отложений парафина. Скребки иногда застревают внутри трубопровода при наличии толстых твердых отложений, что усугубляет ситуацию, как это

произошло на трубопроводе в Мексиканском заливе. В худшем случае производство должно быть остановлено, чтобы заменить закупоренную часть линии, что является большой экономической потерей. Еще одним известным методом удаления парафиновых отложений является использование метода плавления с контролируемым выделением тепла для удаления парафиновых отложений. Затраты на управление отложением парафина в нефтедобывающей промышленности огромны и будут увеличиваться как с точки зрения капитальных затрат (например, профилактические методы), так и эксплуатационных расходов (например, корректирующие методы). Общепризнано, что за счет точного прогнозирования отложения парафина в глубоководных системах можно добиться огромной экономии. Следовательно, фундаментальное понимание явления отложения парафина и комплексная модель осаждения парафина, основанная на этом фундаментальном понимании, стратегически необходимы для решения проблем, связанных с добычей и транспортировкой подводных трубопроводов.

В отсутствие потока осаждение молекул парафина приводит к образованию парафино-водяного-нефтяного геля, где видно закупорку под кросс-поляризованным микроскопом, который может охватывать все поперечное сечение трубы. Чтобы возобновить поток и добывать нефть в установившемся режиме, этот восково-нефтяной гель в трубопроводе должен быть разрушен.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является разработка эффективных технологических решений для повышения добычи СВН с помощью программно аппаратного комплекса Arduino.

III. ВЫБОР ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ

Для достижения поставленной цели и задач необходимо разработать программное обеспечение,

которое позволит отслеживать любое изменение температурного поля на исследуемом участке. Программный продукт позволит наиболее эффективно применять термические методы добычи высокопарафинистой нефти и своевременно принимать управленческие решения по повышению продуктивности и снижению затрат на добычу нефти, наполненной асфальтенами, смолами и парафинами. Для этого был сформулирован комплекс мероприятий, который включает в себя:

1. Моделирование нефтяного пласта при помощи текстолитовой платы и размещение на ней тепловых датчиков.
2. Подключение к тепловым датчикам и программирование микроконтроллера Arduino Mega.
3. Разработку программного продукта в среде Embarcadero Rad Studio на языке программирования Delphi.
4. Подключение Arduino Mega к разработанному программному продукту через COMпорт.
5. Установка дополнения к программе для 3D отображения показаний датчиков.

Главным функциональным требованием к разрабатываемому программному продукту является точное отображение температуры на каждом из тепловых датчиков, а также наглядное отображение температурного поля при помощи 3Dмодели.

Далее будет обоснование выбора способов достижения цели и задач магистерской диссертации согласно комплексу мероприятий, сформулированному выше.

1. Текстолитовая плата служит отличным диэлектрическим конструкционным материалом, отвечающим требованиям для моделирования нефтяного пласта.

В состав текстолита входит полимер и армирующие слои. В основу, как правило, входит бакелит, полиэфирные или эпоксидные смолы. Армирующий материал – ткань, но поскольку она покрыта полимером, исчезает возможность прямого контакта с воздухом и влагой. Благодаря этому, армирующие свойства ткани сохраняются на длительное время. Лист текстолита выдерживает перепады температуры в рамках своего диапазона и не боится влаги.

Листы текстолита находят применение как основу для печатных плат. На них формируют схемы и наносят дорожки из токопроводящего материала, а затем производится пайка деталей.

Таким образом, для моделирования нефтяного пласта была выбрана именно текстолитовая плата.

2. Arduino Mega также выбрана не случайным образом, так как построена на микроконтроллере ATmega2560. Плата имеет 54 цифровых входа/выходов (14 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта UART, кварцевый генератор 16 МГц, USB коннектор, разъем питания, разъем ICSP и кнопка перезагрузки.

3. Выбранная среда разработки Embarcadero RAD Studio XE7 является полномасштабной системой разработки приложений, которые ориентированы на платформы iOS, Android, Mac и Windows, а также на мобильные гаджеты, основанные на едином фундаменте исходного кода.

Embarcadero RAD Studio дает возможность разработать производительное компилированное нативное программное обеспечение, способное функционировать на любых устройствах, имеющих высокий уровень взаимодействия с пользователями. Embarcadero RAD Studio XE7 позволяет программистам расширить свои проекты, ориентированные на Windows, до мобильных приложений, функционирующих с сервисами BaaS и данными предприятия.

Благодаря использованию языка программирования Delphi программные продукты имеют возможность получить высокий уровень отладки, поскольку интегрированный отладчик Delphi включает в себя большое количество полезных для разработчика и его программного продукта свойств.

Также язык программирования Delphi оснащен самым скоростным в мире компилятором, который дает возможность за небольшой отрезок времени перевести программный продукт в машинный код, который сможет функционировать на любом техническом средстве.

Delphi имеет большое преимущество, благодаря возможности визуального создания интерфейса программных продуктов. Это значительным образом упрощает процесс разработки приложений. Также разработчики имеют возможность самостоятельно формировать объекты для программ, что является большим плюсом в разработке уникальных приложений.

4. Для моделирования нефтяного пласта была использована текстолитовая плата, на которую был нанесен рисунок (схема). Далее был осуществлен процесс пайки клеммников, к которым, впоследствии, подключались тепловые датчики.

Сформированный макет был подключен к микроконтроллеру Arduino Mega. Передача данных с Arduino на компьютер осуществляется при помощи COMпорта (последовательного порта).

Порт имеет название «последовательный» благодаря тому, что все данные по нему передаются последовательно, равными шагами, равными 1 биту. Главным отличием от параллельного порта является то, что информация поступает бит за битом.

Данный порт обладает стандартом RS232C и, в отличие от других «последовательных» технологий, он имеет определенную особенность, заключающуюся в отсутствии какого-либо временного требования между двумя байтами. Это не означает, что временных требований вовсе нет. Они присутствуют, но исключительно между битами в пределах одного байта.

5. Для визуального отображения данных, поступающих с тепловых датчиков, было решено разработать 3Dмодель, при помощи модуля Plot 3D. Это модуль, основная задача которого – формирование 3Dграфиков. С помощью приложения можно создавать полностью настраиваемые 3Dграфики математических функций, задавая точность и границы построения.

Поддерживается множество функций, в том числе тригонометрические функции, корень, логарифм.

Каждая строка в таблице данных представлена маркером, положение которого зависит от его значений в столбцах, установленных на осях X, Y и Z.

Модуль Plot 3D содержит визуальный компонент Delphi / C++ Builder, поддерживающий отображение трехмерных поверхностей. Поверхности определяются прямоугольной сеткой значений высоты, и их можно рассматривать под любым углом и в любом направлении.

Plot 3D отображает данные в виде трехмерных цветных поверхностей, которые можно вращать на экране. Вращение данных может быть достигнуто либо взаимодействием с мышью, либо использованием встроенных методов класса. Данные можно просматривать с любого направления, масштабировать и панорамировать. Глядя на поверхность сверху, создается цветной контур.

Модуль `SDL_plot3d` является частью набора компонентов SDL, который состоит из значительного количества подпрограмм и классов для вычислений в науке и технике. Набор компонентов доступен для Delphi и C++Builder.

IV. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ

Следующим, после формирования требований, которым должен отвечать разрабатываемый продукт, а также согласования комплекса мероприятий по разработке ПО, стал этап создания модели процесса добычи высокопарафинистой нефти.

Первый этап создания модели включает в себя создание схемы на тектолитовой пластине. Для того, чтобы сигнал проходил именно по той траектории, которая необходима, на тектолитовой пластине был нанесен устойчивый к травлению слой перманентного маркера в виде необходимой для моделирования нефтяного пласта схемы. Следующим этапом стало вытравливание заготовки в химикате.

Следующий этап в создании макетной платы стало удаление растворителем закрашенных перманентным маркером элементов.

На рис. 1 изображена готовая для пайки макетная плата. Далее на макетной плате было произведено сверление, установка клеммников и внедрение в них тепловых датчиков.

Для сбора и передачи информации с тепловых датчиков, они были подключены к микроконтроллеру Arduino Mega. Далее была разработана программная часть. При запуске программы появляется окно для выбора COM-порта и проверки на работоспособность Arduino. После выбора COM-порта необходимо нажать на кнопку «Подключение», чтобы запустить процесс проверки подключения. Если по какой-либо причине COM-порт не смог подключиться к Arduino, программа выводит сообщение об ошибке для уведомления пользователя

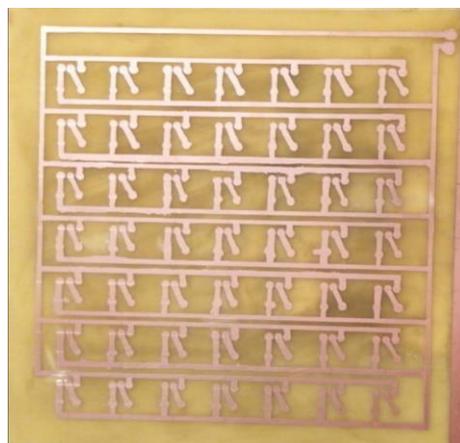


Рис. 1. Подготовленная для пайки макетная плата

При корректном подключении откроется окно с формой, на которой присутствует: в верхней части программы – бегунок для зумирования 3D модели. В правой части находится основное меню для управления программой, которое включает в себя следующие кнопки: «Старт», «Стоп», «Датчики», «Настройки» и «Выход».

При нажатии на кнопку «Старт» программа начинает взаимодействовать с Arduino при помощи COM-порта. В панели уведомлений появляется сообщение о состоянии приема данных. После запуска программы кнопка «Старт» становится недоступной для повторного нажатия.

На рис. 2 изображена корректно работающая программа после запуска.

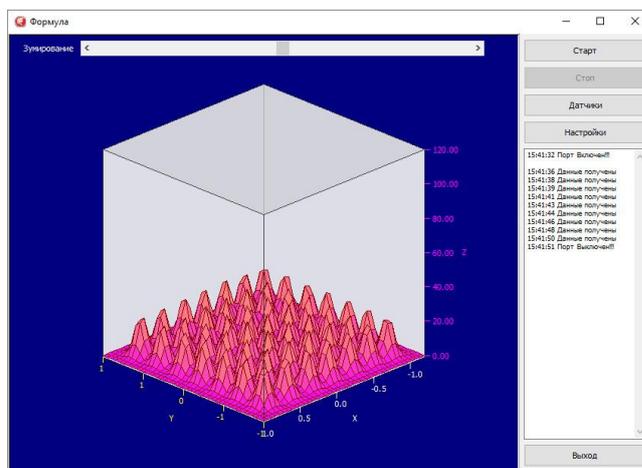


Рис. 2. Программный продукт в работающем состоянии

При нажатии на кнопку «Стоп» программа останавливает процесс работы. В панели уведомлений появляется запись о том, что порт выключен. Кнопка «Старт» становится доступной для нажатия, а «Стоп» блокируется.

При нажатии на кнопку «Датчики» формула 3D модели исчезает, и на экране отображаются показатели температуры каждого температурного датчика. Для того, чтобы пользователь мог вернуться к отображению 3D-модели, разработана специальная кнопка «Формула в 3D». На рис. 3 изображена форма «Датчики».

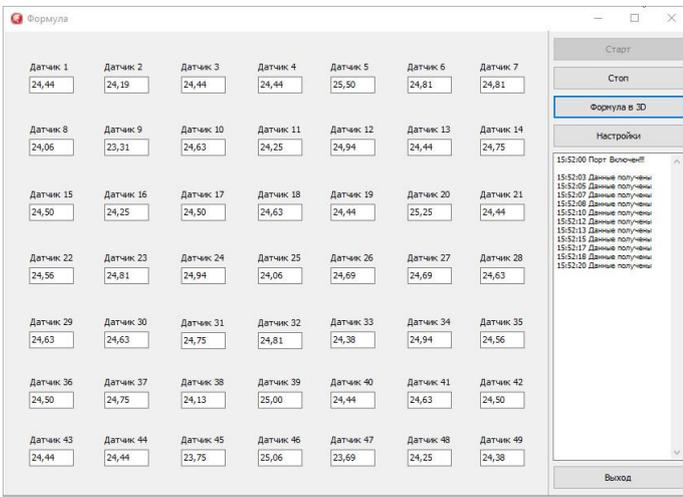


Рис. 3. Форма «Датчики»

При помощи модуля «Настройки» 3D-модели пользователь может изменить высоту, ширину и глубину 3D модели по координатам x,y,z при помощи бегунка. Также есть возможность изменения цвета координат в самой модели при помощи выпадающего списка цвета. Кроме этого, можно включить и выключить визуализацию координат при нажатии на checkbox.

Кроме этого, есть возможность включения и выключения отображения сетки на самой модели, а также смены ее цвета при необходимости.

В настройках есть возможность изменения цвета непосредственно самой модели в трех вариациях: верхней части модели, средней с возможностью включения и выключения подсветки при нажатии на checkbox, а также нижней части модели. Помимо этого, существует возможность сдвига центральной подсветки по оси z (вертикаль) для лучшего отслеживания температуры.

Также есть функция отображения фона модели. При необходимости фон можно полностью убрать, сделать прозрачный каркас или полностью скрыть. На рис. 4 изображен модуль «Настройки».

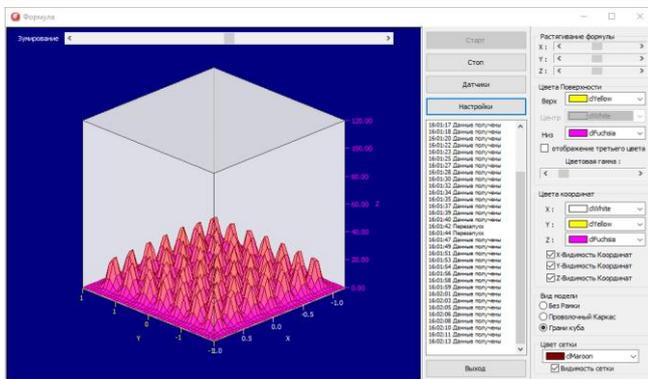


Рис. 4. Модуль «Настройки» 3D-модели

При нажатии на кнопку «Настройки» при включенном окне «Датчики» открывается окно настроек для Датчиков.

В данном модуле пользователь может установить вручную верхний предел нормы температуры и цвет для нормального и верхнего пределов температуры датчиков.

На рис. 5 изображено превышение температуры на датчиках №1–7.

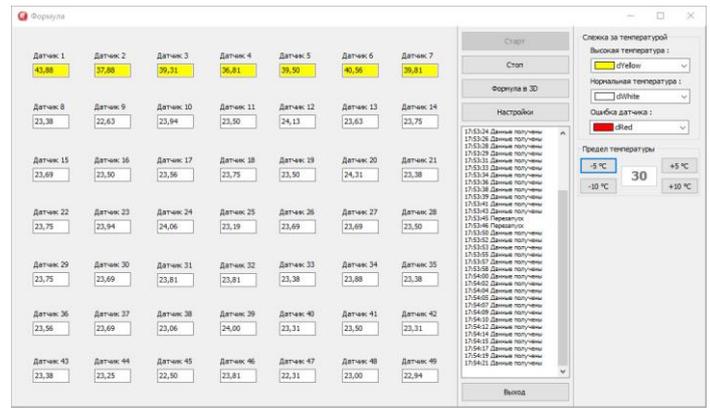


Рис. 5. Превышение температуры

В случае, если температуре ниже нуля или температурный датчик неисправен, программа уведомляет пользователя об этом. На рис. 6 изображены ошибки датчиков №8–49.

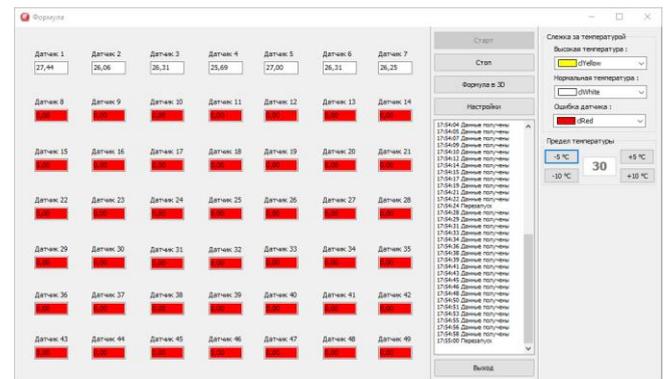


Рис. 6. Ошибка датчиков

Таким образом, была разработана программа мониторинга температурного поля добычи высокопарафинистой нефти. Программа включает в себя сорок девять температурных датчиков, которые были расположены на текстолитовой плате. Данные с датчиков собирает микроконтроллер Arduino Mega и передает в программу.

Разработанное ПО дает возможность пользователю наглядно увидеть изменения температуры на каждом из датчиков как в 3D-модели, так и в табличном отображении.

Программа может совершенствоваться путем ввода новых модулей, установления большего количества датчиков и наращивания функциональных способностей.

V. ВЫВОДЫ

В работе был проведен анализ литературных источников, подтверждающий актуальность и значимость исследования, сформулирована концептуальная и математические модели. Также была разработана программа мониторинга температурного поля добычи высокопарафинистой нефти. Программа включает в себя сорок девять температурных датчиков, которые были расположены на текстолитовой плате. Данные с датчиков собирает микроконтроллер Arduino Mega и передает в программу. Разработанное ПО дает возможность пользователю наглядно увидеть изменения температуры на каждом из датчиков как в 3D-модели,

так и в табличном отображении. Программа может совершенствоваться путем ввода новых модулей, установления большего количества датчиков и наращивания функциональных способностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Golovina E., Shchelkonogova O. Possibilities of Using the Unitization Model in the Development of Transboundary Groundwater Deposits. *Water (Switzerland)*, 2023, 15(2), 298. <https://doi.org/10.3390/w15020298>
- [2] Ilyushin Y., Afanaseva O. Development of the drilling screws temperature field pulse management for the Kislovodsky narzan deposit hot mineral water mining (2019) International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 19 (2.1), pp. 849-856.
- [3] Ilyushin Y.V. Development of a Process Control System for the Production of High-Paraffin Oil. *Energies* 2022, 15, 6462. <https://doi.org/10.3390/en15176462>
- [4] Marinina O., Nechitailo A., Stroykov G., Tsvetkova A., Reshneva E., Turovskaya L. Technical and Economic Assessment of Energy Efficiency of Electrification of Hydrocarbon Production Facilities in Underdeveloped Areas. *Sustainability* 2023, 15, 9614. <https://doi.org/10.3390/su15129614>
- [5] Pershin I.M., Papush E.G., Kukharova T.V., Utkin V.A. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral Water Wells. *Water* 2023, 15, 2289. <https://doi.org/10.3390/w15122289>
- [6] Kukharova T.V., Ilyushin Y.V., Asadulagi M.-A.M. Investigation of the OA-300M Electrolysis Cell Temperature Field of Metallurgical Production. *Energies* 2022, 15, 9001. <https://doi.org/10.3390/en15239001>
- [7] Olga Afanaseva, Oleg Bezyukov, Dmitry Pervukhin, Dmitry Tukeev. Experimental Study Results Processing Method for the Marine Diesel Engines Vibration Activity Caused by the Cylinder-Piston Group Operations. *Inventions* 2023, 8(3), 71; <https://doi.org/10.3390/inventions8030071>
- [8] Ilyushin Y.V., Kapostey E.I. Developing a Comprehensive Mathematical Model for Aluminium Production in a Soderberg Electrolyser. *Energies* 2023, 16, 6313. <https://doi.org/10.3390/en16176313>
- [9] Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Chernyshev A.B. Investigation of Popov's Lines' Limiting Position to Ensure the Process Control Systems' Absolute Stability. In Proceedings of the 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 24–26 May 2023, pp. 69–72. <https://doi.org/10.1109/SCM58628.2023.10159089>.
- [10] Ereemeeva A.M., Kondrasheva N.K., Khasanov A.F., Oleynik I.L. Environmentally Friendly Diesel Fuel Obtained from Vegetable Raw Materials and Hydrocarbon Crude // *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 5. <https://doi.org/10.3390/en16052121>
- [11] Sidorenko A.A., Dmitriev P.N., Alekseev V.Yu., Sidorenko S.A. Improvement of techno-logical schemes of mining of coal seams prone to spontaneous combustion and rockbumps. *Journal of Mining Institute*. 2023, p. 1-13. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.37>
- [12] Martirosyan K.V., Chenyshev A.B., Martirosyan A.V. Application of Bayes Networks in the Design of the Information System "Mineral Water Deposit". In Proceedings of the 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 24–26 May 2023; pp. 236–239. <https://doi.org/10.1109/SCM58628.2023.10159085>.
- [13] Katysheva E. Analysis of the Interconnected Development Potential of the Oil, Gas and Transport Industries in the Russian Arctic. *Energies* 2023, 16, 3124. <https://doi.org/10.3390/en16073124>
- [14] Polekhina V.S., Shestopalov M.Y., Ilyushin Y.Y. Identification of Magnetic Field Strength Realisation as a Necessary Solution for High-Quality Metal Synthesis (2022) Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022, pp. 831-833. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755649
- [15] Ereemeeva A.M., Ilyushin Y.V. Automation of the control system for drying grain crops of the technological process for obtaining biodiesel fuels. *Sci Rep* 13, 14956 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41962-0>