УДК 658.512.2 + 004.31

Конструктивные и мехатронные аспекты совершенствования внутритрубного очистного устройства для решения задачи создания теплоизоляционного слоя из асфальтосмолопарафиновых отложений

И.И. Хасанов[1]✉, Р.А. Шакиров[2]✉

[1]*Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация*
[2]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Российская Федерация*

Резюме. На протяжении последних десятилетий одной из ключевых проблем эксплуатации магистральных нефтепроводов является образование асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) и их оседание на внутренней стенке трубопроводов при перекачке высокопарафинистой нефти. Данный процесс характерен как для новых месторождений, расположенных в Западной Сибири, так и для находящихся на III стадии разработки месторождений с высокой степенью разведанности и постепенно снижающимся объемом добываемой нефти и ее качеством. Процесс парафинизации труб является негативным фактором как для процессов транспорта нефти, так и последующей диагностики магистральных нефтепроводов, снижая надежность нефтетранспортной системы. На сегодняшний день на практике борьба с АСПО осуществляется по двум направлениям: удаление сформировавшихся отложений путем пропуска внутритрубных очистных устройств и предотвращение их образования путем применения соответствующих ингибиторов. По результатам исследований, проведенных рядом ученых, в том числе авторами статьи, была рассмотрена и подтверждена экономическая обоснованность идеи об эффективности использования формируемого слоя АСПО на внутренней стенке трубопровода как дополнительного внутреннего теплоизоляционного слоя. На данный момент в промышленной эксплуатации отсутствует устройство, конструктив которого позволяет сформировать равномерный слой АСПО.

Ключевые слова: моделирование, магистральный нефтепровод, очистное устройство, АСПО, мехатроника, прототип, Arduino, теплоизоляция.

Для цитирования: Хасанов И.И., Шакиров Р.А. Конструктивные и мехатронные аспекты совершенствования внутритрубного очистного устройства для решения задачи создания теплоизоляционного слоя из асфальтосмолопарафиновых отложений. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(2). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1580

Structural and mechatronic aspects of improving the pipeline cleaning pig for creating a heat-insulating layer of wax deposits

I.I. Khasanov[1]✉, R.A. Shakirov[2]✉

[1]*Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, the Russian Federation*
[2]*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, the Russian Federation*

Abstract. Over the last decades one of the key problems of operation of trunk oil pipelines is formation of wax desposits and their deposition on the inner wall of pipelines during pumping of highly paraffinic oil. This process is characteristic both for new fields located in Western Siberia and for fields at the III

© Хасанов И.И., Шакиров Р.А., 2024

stage of development with a high degree of exploration and gradually decreasing oil production volume and quality. Paraffinisation of pipes is a negative factor both for oil transportation processes and subsequent diagnostics of main oil pipelines, reducing the reliability of the oil transportation system. Nowadays in practice the struggle against wax deposits is carried out in two directions: removal of formed deposits by means of in-pipe cleaning devices and prevention of their formation by means of application of appropriate inhibitors. According to the results of researches conducted by a number of scientists, including the authors of the article, the economic feasibility of the idea about the efficiency of using the formed wax deposits layer on the inner wall of the pipeline as an additional internal thermal insulation layer was considered and confirmed. At the moment, there is no device in industrial operation whose design allows the formation of a uniform layer of paraffin deposits.

Keywords: modeling, main oil pipeline, treatment device, asphalt resin-paraffin deposits, mechatronics, prototype, Arduino, thermal insulation.

For citation: Khasanov I.I., Shakirov R.A. Structural and mechatronic aspects of improving the pipeline cleaning pig for creating a heat-insulating layer of wax deposits. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1580 (In Russ.).

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений развития сырьевой базы нефтяной и газовой промышленности России можно назвать поиск, разведку и освоение нефтяных и газовых месторождений на континентальном шельфе арктических, дальневосточных и южных морей. Текущие запасы нефти на Арктическом шельфе по состоянию на 2023 г. оцениваются в 17 млрд т, что составляет 20 % от общероссийских запасов нефти. При этом считается, что на сегодняшний день разведаны далеко не все запасы нефти. По мнению главы Федерального агентства по недропользованию, запасы нефти и газа на российском континентальном шельфе Арктики являются стратегическим резервом в развитии минерально-сырьевой базы Российской Федерации. Помимо этого, в арктической зоне находится свыше 97 % российских запасов платиноидов, 43 % запасов олова, значительное количество никеля, титана и руд редкоземельных металлов [1].

Значимость ресурсов на нефтегазовом шельфе Арктики объясняется не только значительными сосредоточенными запасами нефти, но и постепенным ухудшением качества добываемой нефти. Еще в конце 1990-х годов отмечалась высокая степень выработанности крупных высокопродуктивных месторождений: так, по состоянию на 2000 г. степень выработанности запасов на Самотлорском месторождении составляла 70 %, Арланском – 80 %, Ромашкинском – 87 % [2]. Вытекающая из этого проблема снижения качества, также характеризуемая увеличением доли высокосернистой нефти, поступаемой в систему магистральных нефтепроводов, приводит к следующим последствиям:

– уменьшение доли выхода светлых нефтепродуктов на нефтеперерабатывающих заводах;

– увеличение частоты обслуживания и ремонта оборудования как на магистральных нефтепроводах, так и на ряде нефтеперерабатывающих заводов.

В целом, высокая степень выработанности месторождений и износ оборудования влияет не только на вышеперечисленные факторы, но и на высокую себестоимость переработанной нефти, низкую степень переработки и недостаточную загрузку производственных мощностей [3].

Увеличение операционных затрат на эксплуатацию магистральных нефтепроводов можно связывать не только с увеличением доли серы в нефти. Для месторождений, находящихся на III стадии разработки с высокой степенью

разведанности, характерным процессом является увеличение концентрации парафинов в нефти, что особенно характерно для нефти Волго-Уральского региона [4]. Транспорт подобной нефти осложнен выпадением асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО), которые по мере снижения температуры нефти в результате теплообмена в системе «нефть – трубопровод – грунт» кристаллизуются и под действием турбулентных сил закрепляются на внутренней стенке трубопровода. С увеличением доли содержания парафинов температура начала массовой кристаллизации парафинов может увеличиться, что приведет к увеличению объема выпадаемых АСПО и большему сокращению проходного сечения трубопровода [5].

Процесс парафинизации нефтепроводов широким кругом специалистов рассматривается как негативное явление, отрицательно влияющее на эксплуатацию нефтепроводов:

– за счет скопления на внутренних стенках нефтепроводов АСПО уменьшается проходное сечение нефтепровода, что негативно влияет на его производительность [6]; данное явление крайне характерно не только для магистральных нефтепроводов, но и для внутрискважинного оборудования при добыче нефти [7];

– наличие отложений по длине трубопровода приводит к увеличению давления на головной станции и, как следствие, увеличению энергозатрат на перекачку;

– для трубопроводов с осложненными условиями залегания с высокой интенсивностью парафинизации (преимущественно промысловые) проведение работ по очистке внутренней полости может быть затруднено вследствие погодных условий, что может приостановить работу трубопровода или технологические процессы на месторождении в целом;

– наличие АСПО может влиять на отсутствие результатов по обследованию участков трубопроводов ультразвуковым методом, так как происходит искажение результатов по причине снижения скорости распространения ультразвука в парафине и затуханию ультразвукового сигнала, отраженные волны которого не фиксируются приемными датчиками дефектоскопа.

Материалы и методы

На сегодняшний день борьба с АСПО подразделяется на два направления: предотвращение кристаллизации и оседания отложений (наиболее распространен на промысле) и удаление уже сформированных образований с внутренней поверхности трубы (наиболее распространен в магистральном транспорте нефти). Ввиду не установленного до конца влияния реологических характеристик нефти и режима работы трубопровода на эффективность того или иного метода борьбы, подбор осуществляется опытным путем.

Физические методы воздействия на нефть, которые включают в себя воздействие вибрационных и ультразвуковых колебаний, тепловых, магнитных, электрических и электромагнитных полей, приводят к разрушению структуры нефтяных ассоциатов, сформированных смолисто-асфальтеновыми веществами и парафиновыми углеводородами, что позволяет улучшить низкотемпературные свойства и частично предотвращает выпадение парафинов [8]. Среди наиболее характерных физических методов воздействия выделяются ультразвуковой, сверхвысокочастотный (СВЧ) и магнитный. В то же время наиболее распространенными методами по предотвращению выпадения АСПО на сегодняшний день являются тепловые (нагрев для увеличения температуры нефти в начале участка перекачки) и химические (применение ингибиторов парафиноотложения для предотвращения образования центров кристаллизации парафиновых углеводородов).

Однако в магистральном транспорте нефти наиболее популярным и экономически целесообразным методом является применение внутритрубных очистных устройств (очистных скребков), действие которых направлено на максимальное удаление с внутренней поверхности трубопроводов сформировавшихся и закрепившихся АСПО.

Ранее рядом ученых, в том числе авторами, была исследована возможность использования АСПО в качестве дополнительного внутреннего теплоизоляционного слоя. Идея о полезном применении отложений основана на низкой теплопроводности парафина, составляющего значительную долю в составе отложений. При моделировании процесса запарафинивания нефтепроводов было установлено уменьшение теплопередачи от перекачиваемой нефти в грунт, вследствие чего температура нефти по длине трубопровода снижается медленнее [9]. При этом ранее авторами было установлено, что для промысловых нефтепроводов диаметром до 325 мм возможность применения АСПО в качестве внутренней тепловой изоляции является нерациональной, поскольку по сравнению с магистральными трубопроводами интенсивность парафинизации нефтепроводов существенно выше, а график распределения отложений по длине нефтепровода демонстрирует, что практически все АСПО оседают на первых километрах трассы трубопровода, что не позволяет реализовать идею о равномерном распределении [10].

Также дополнительным ограничением к созданию теплоизоляционного слоя является возможная экономическая нерентабельность. Поскольку создание теплоизоляционного слоя сужает проходное сечение трубопровода, удельный объем перекачиваемой нефти и, как следствие, доход от трубопроводного транспорта нефти может сократиться настолько существенно, что потенциальная экономия от уменьшения энергорасходов на нагрев нефти в пунктах перекачки уменьшит удельную прибыль. Возможность применения технологии является индивидуальной и требует предварительного анализа реологических характеристик перекачиваемой нефти и анализа геологических и геометрических характеристик трассы трубопровода и условий его залегания.

Продолжением исследования, равно как и целью текущей работы, является создание функционального прототипа устройства, позволяющего при прохождении по трассе трубопровода сформировать на внутренних стенках равномерный слой АСПО заданной толщины для уменьшения теплообмена в системе «нефть – трубопровод – грунт».

Наиболее близким к предполагаемому устройству является очистной скребок типа СКР-4, предназначенный для очистки внутренних поверхностей трубопроводов, помимо парафиносодержащих отложений, от мусора, металлических предметов и продуктов коррозии. Принцип работы скребка основан на соприкосновении полиуретановых чистящих пластин и манжет с металлической кромкой, а также стальных щеток с внутренней поверхностью нефтепровода. Под действием давления, создаваемого потоком движущейся нефти, абсолютная часть АСПО удаляется со стенок трубопровода. В задней секции устройства устанавливается передатчик, закрепленный к заднему фланцу и защищенный от механических повреждений бампером. Передатчик позволяет отследить положение очистного скребка при прохождении им контрольных пунктов трубопровода. Как было отмечено ранее, главной и единственностью целью работы устройства является очистка внутренней поверхности нефтепровода, возможность сбора количественных характеристик о трассе трубопровода не предусмотрена.

В рамках данного исследования целью является разработка устройства и проверка работоспособности на предмет создания слоя АСПО заданной толщины в рамках эксперимента с напечатанным функциональным прототипом.

При этом конструкция устройства должна решать следующие задачи, не рассматриваемые в данном исследовании:

– измерение внутренней геометрии трубопровода;

– создание профиля внутренней поверхности, фактически представляющего собой распределение АСПО по длине в местах соприкосновения измерительных датчиков с образующей трубопровода.

Конструктивное строение разработанного в программном продукте КОМПАС-3D прототипа внутритрубного устройства имеет несколько существенных отличий, представленных на Рисунке 1:

– монтаж рычагов 1 для установки потенциометров;
– наличие закрепных элементов 2 для монтажа пружин;
– наличие секции для монтажа микроконтроллера Arduino Nano 3;
– скорректированная форма полиуретановой манжеты 4;
– скорректированная конструкция секции с щетками 5.

Чертеж устройства представлен на Рисунке 2.

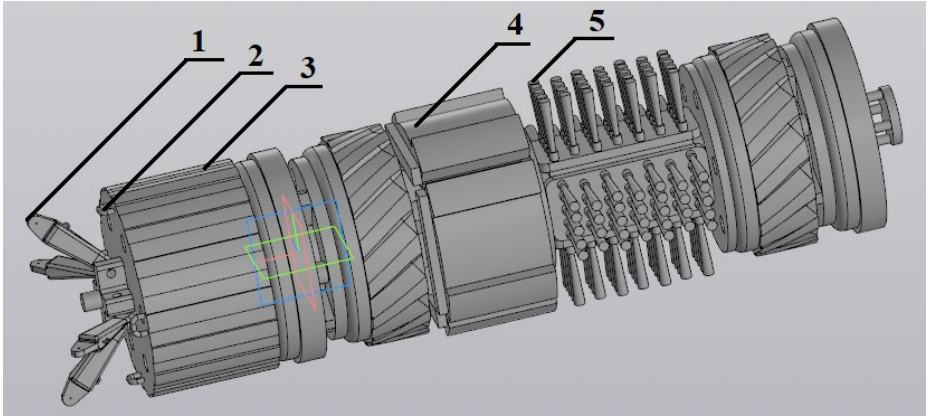


Рисунок 1 – 3D-модель прототипа устройства
Figure 1 – 3D-model of the device prototype

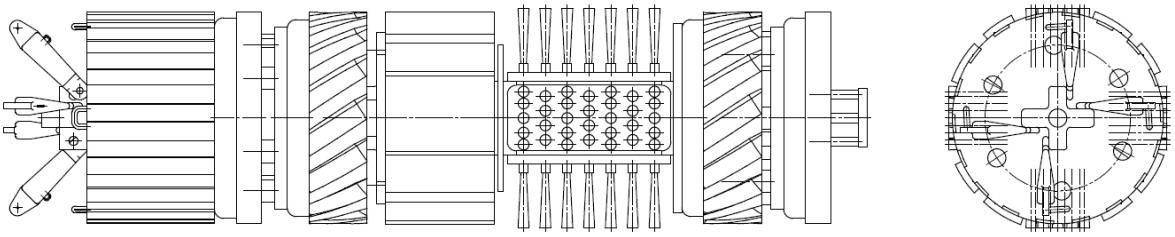
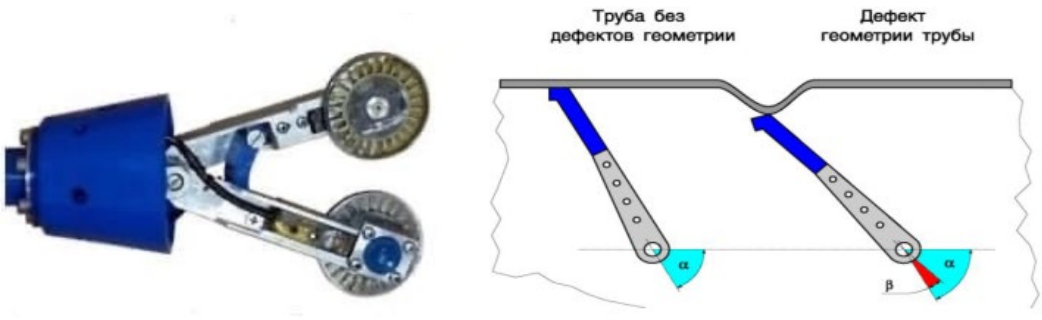


Рисунок 2 – Проекции чертежа прототипа
Figure 2 – Projections of the prototype drawing

На сегодняшний день в опытной эксплуатации измерение внутренней геометрии (профилеметрии) трубопровода реализовано путем пропуска соответствующих внутритрубных устройств профилемеров. Профилемер представляет из себя снаряд по типу очистных скребков, оснащенный измерительной системой из множества рычагов с

одометрическими колесами (Рисунок 3 а), которые представляют собой колесо с энкодером (например, потенциометром). Одометрические колеса прижимаются к внутренней поверхности трубы (положение угла относительно оси прибора при этом фиксируется как базовое) и при прохождении через различные препятствия геометрии трубопровода (сварные швы, вмятины, АСПО) отклоняются от своего базового положения (Рисунок 3 б). Преобразование перемещения в последовательность сигналов и его регистрация после обработки позволяет определить изменение угла рычага и, соответственно, толщину дефекта или АСПО на внутренней поверхности трубы. Данная система вкупе с локаторным блоком (датчиком перемещения) позволяет измерить и создать профиль внутренней поверхности трубопровода, тем самым оценить распределение АСПО по его длине. Использование блока профилеметрии обусловлено тем, что в опытной эксплуатации внутритрубных устройств стоимость профилеметрии ниже, чем стоимость ультразвуковой или магнитной диагностики, а интерпретация собранных данных значительно проще и надежнее [11].



а б

Рисунок 3 – Профилеметрия: а – секция для внутритрубных устройств; б – изменение положения рычага с одометром
Figure 3 – Profile logging: a – section for in-line devices; b – change of position of lever with odometer

Для разработанного прототипа базовое положение рычагов было зафиксировано с помощью пружин растяжения, которые соединяются с основной секцией устройства и рычагами. Пружина растягивается при движении устройства в трубопроводе и наличии на внутренней стенке трубопровода отложений. Установленным потенциометром предполагается фиксировать изменение геометрии трубопровода.

Получение сигналов с потенциометров и передача на персональный компьютер предполагается путем радиосвязи. В рамках проработки прототипа устройства решение задачи может быть выполнено путем применения двух плат Arduino Nano и модулей NRF24L01, обмен данных между которыми осуществляется по радиосвязи на частоте 2,4 ГГц. Подключение радиомодуля NRF24l01 к Arduino осуществляется по SPI-интерфейсу. Блок-схема обработки данных представлена на Рисунке 4.

Рисунок 4 – Блок-схема обработки данных
Figure 4 – Block diagram of data processing

Задача по созданию внутреннего теплоизоляционного слоя предполагала существенную модернизацию конструктива объекта-аналога, поскольку установленные полиуретановые манжеты, помимо очистных свойств, используются для центрирования скребка при его прохождении по нефтепроводу. При этом основным элементом для очистки нефтепровода от АСПО должны являться стальные щетки, которые должны быть уменьшены по высоте на требуемую толщину создаваемого внутреннего теплоизоляционного слоя. Конструктивно решение представлено на Рисунке 5.

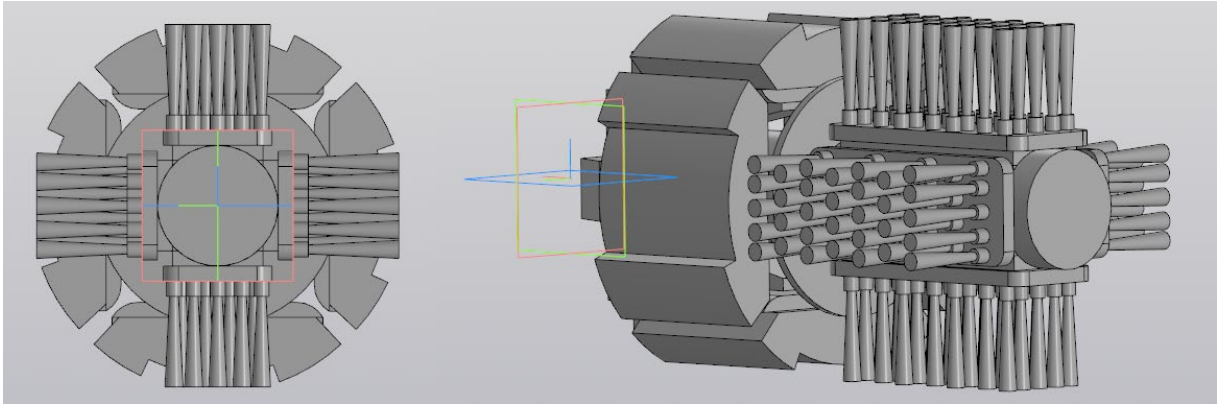
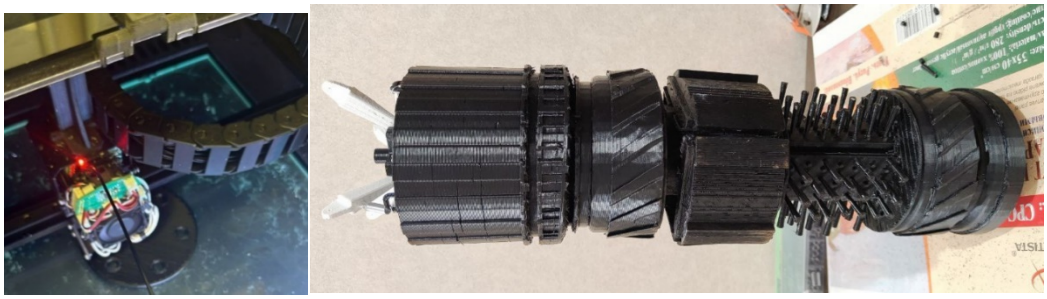


Рисунок 5 – Создание блока формирования теплоизоляционного слоя
Figure 5 – Creation of a block for formation of the thermal insulation layer

Для прототипа число блоков со стальным щетками уменьшено до четырех (верхняя, нижняя и боковые образующие), в этих же местах толщина манжеты уменьшена на высоту оставляемого теплоизоляционного слоя. В зависимости от диаметра трубопровода число блоков со стальными щетками и вырезов в манжетах может быть увеличено, например, до 16; до этого же значения должно быть увеличено число рычагов и одометрических колес в секции профилеметрии.

Технологические процессы по созданию прототипа представлены на Рисунке 6 а и Рисунке 6 б. Прототип, разработанный для проведения эксперимента в трубе с

условным диаметром 125 мм и создаваемым внутреннем слоем АСПО толщиной 2 мм, был напечатан из черного пластика типа ABS с диаметром прутка 1,75 мм.



а б

Рисунок 6 – Процесс создания прототипа: а – 3D-печать; б – процесс сборки
Figure 6 – Prototyping process: a – 3D printing; b – assembling

Результаты

Разработан функциональный прототип модели внутритрубного устройства для трубопровода малого диаметра, позволяющий создать внутренний теплоизоляционный слой из имеющихся АСПО, а также оценить внутренний профиль трубопровода в случае применения потенциометров в качестве датчиков измерения геометрии трубопровода.

Обсуждение

Для подтверждения технической эффективности конструкции устройства была использована соответствующая труба 133×4 мм с имитацией сформированных на внутренней стенке трубопровода АСПО из пластилина. Выбор материала был обусловлен тем, что он позволяет воссоздать процесс очистки поверхности трубопровода от АСПО с учетом материала, из которого изготовлен прототип. После прохождения устройства по трубопроводу наблюдается, что в отличие от очистного скребка стандартной конструкции, целью которого является полная очистка внутренней поверхности от отложений, при применении прототипа только часть отложений была срезана блоком из щеток по каждой образующей, а заданный слой толщиной 2 мм остается на внутренней поверхности трубопровода. Это позволяет заявить о том, что цель о создании внутритрубного теплоизоляционного слоя АСПО заданной толщины технически реализуема. В случае производства опытного образца очистка трубопровода от АСПО с формированием слоя заданной толщины будет обеспечена, поскольку при производстве опытного образца для щеток предполагается использовать тот же материал (сталь), что и в очистных скребках, которые используются в настоящее время во внутритрубной диагностике.

Полученные в ходе эксперимента результаты свидетельствуют, что разработанная конструкция прототипа устройства, учитывающая преимущества и недостатки существующих близких по конструктиву внутритрубных устройств, позволяет реализовать основную техническую задачу по созданию равномерно распределенного внутреннего слоя из АСПО, а также определять внутреннюю геометрию трубопровода.

Разработанный прототип устройства коррелирует с технологией последовательного запарафинивания нефтепровода, описанной авторами исследования [12]. В то же время проверка экономической эффективности использования подобного устройства может быть осуществлена только при создании опытного образца

соответствующего диаметра (от 530 мм для магистральных нефтепроводов) и его испытании на действующем участке магистрального нефтепровода, поскольку технология последовательного запарафинивания требует, как минимум, четырехкратного пропуска устройства для наглядной демонстрации результатов.

Перспективы исследования

Продолжением данного исследования является доработка разработанного прототипа путем дооснащения с возможностью измерения внутренней геометрии трубопровода и создание профиля внутренней поверхности, фактически представляющего собой распределение АСПО по длине в местах соприкосновения измерительных датчиков с образующей трубопровода.

Одной из перспективных задач по развитию модели является создание блока регулируемой очистки, когда толщина создаваемого равномерного слоя АСПО будет автоматически меняться в зависимости от толщины имеющихся отложений по мере прохождения устройства по трубопроводу. В оригинальной конструкции очистного скребка СКР-4 металлические щетки закреплены накладками, которые, в свою очередь, крепились к задней обечайке корпуса с помощью шпилек и гаек с шайбами.

В основе блока регулируемой очистки внутритрубного устройства может лежать простой механизм работы запорной арматуры. Принцип работы вентиля заключается в том, что при движении оператором маховика шпиндель совершает вертикальное перемещение, вследствие чего пространство, ограниченное седлом, через которое поступает продукт, может быть ограничено за счет его перекрытия клапаном. Регулировка маховика позволяет перекрыть седло в том числе частично.

Таким образом, блок регулируемой очистки подразумевает собой установку под накладки со стальными щетками штоков, высота которых регулируется автоматически в зависимости от необходимой для эффективной очистки. При этом в наименьшем положении шток будет углубляться в специальный паз на поверхности корпуса очистного устройства.

Заключение

В работе приведен процесс и результат проектирования и испытания прототипа внутритрубного устройства для создания внутреннего равномерного теплоизоляционного слоя из АСПО. Полученный результат позволяет продолжить работу по изготовлению опытного образца устройства для магистрального трубопровода с минимальным диаметром (530 мм) из требуемых для опытных испытаний материалов (сталь, полиуретан) и полным дооснащением в виде промышленных одометрических колес и блока регулируемой очистки внутритрубного устройства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Бояринов А.Ю., Литвинова О.В. Перспективы освоения арктического шельфа. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021;(2-2):19–22. https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.2.034
   Boyarinov A.Yu., Litvinova O.V. Prospects for the development of the arctic shelf. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal.* 2021;(2-2):19–22. (In Russ.). https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.2.034
2. Синяк Ю.В. Нефть России на внешнем и внутреннем рынках: возможности и ограничения. *Проблемы прогнозирования.* 2000;(6):44–65.
   Sinyak Yu.V. Russian oil on foreign and domestic markets: potentials and limitations. *Studies on Russian Economic Development.* 2000;11(6):567–581.

3. Рыженко В.Ю. Нефтяная промышленность России: состояние и проблемы. *Перспективы науки и образования.* 2014;(1):300–308.
Ryzhenko V.Iu. Russian oil industry: state and problems. *Perspektivy nauki i obrazovaniya = Perspectives of Science and Education.* 2014;(1):300–308. (In Russ.).
4. Полищук Ю., Ященко И. Сравнительный анализ качества российской нефти. *Технологии топливно-энергетического комплекса*. 2003;(3):51–56.
Polishchuk Yu., Yashchenko I. Sravnitel'nyi analiz kachestva rossiiskoi nefti. *Tekhnologii toplivno-energeticheskogo kompleksa.* 2003;(3):51–56. (In Russ.).
5. Хасанова К.И., Дмитриев М.Е., Мастобаев Б.Н. Повышение эффективности применения средств и методов борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями в процессе транспорта нефти по магистральным трубопроводам. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья.* 2013;(3):7–12.
Hasanova K.I., Dmitriev M.E., Mastobaev B.N. More effective use of poverty and methods asphaltene deposition in the transport process of oil through pipelines. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya = Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons.* 2013;(3):7–12. (In Russ.).
6. Жиганнуров Р.М., Шаммазов И.А., Мастобаев Б.Н. Развитие методов и средств неразрушающего контроля магистральных трубопроводов. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья.* 2009;(2-3):3–9.
Zhigannurov R.M., Shammazov I.A., Mastobaev B.N. Non-destructive testing methods and equipments development of the pipeline. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya = Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons.* 2009;(2-3):3–9. (In Russ.).
7. Сюзев А.В., Лекомцев А.В., Мартюшев Д.А. Комплексная методика подбора реагентов для удаления асфальтеносмолопарафиновых отложений в механизированных нефтедобывающих скважинах. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2018;329(1):15–24.
Syuzev A.V., Lekomtsev A.V., Martyushev D.A. Complex method of selecting reagents to delete asphaltenosmolaparinine deposits in mechanized oil-producing wells. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2018;329(1):15–24. (In Russ.).
8. Глущенко В.Н., Силин М.А., Герин Ю.Г. *Нефтепромысловая химия. Т. 5: Предупреждение и устранение асфальтеносмолопарафиновых отложений.* Москва: Интерконтакт Наука; 2009. 475 с.
Glushchenko V.N., Silin M.A., Gerin Yu.G. *Neftepromyslovaya khimiya. T. 5: Preduprezhdenie i ustranenie asfal'tenosmoloparafinovykh otlozhenii.* Moscow: Interkontakt Nauka; 2009. 475 p. (In Russ.).
9. Ревель-Муроз П.А., Гильмутдинов Н.Р., Дмитриев М.Е., Мастобаев Б.Н. Моделирование теплового режима при создании контролируемого слоя АСПО на внутренней поверхности нефтепроводов. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья.* 2016;(1):9–12.
Revel'-Muroz P.A., Gil"mutdinov N.R., Dmitriev M.E., Mastobaev B.N. Modeling of thermal mode during making controlled paraffin layer on the inner surface of oil pipelines. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya = Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons.* 2016;(1):9–12. (In Russ.).
10. Хасанов И.И., Шакиров Р.А., Каширина Д.А. Моделирование и определение характеристик процесса парафинизации магистральных нефтепроводов. Часть 2. Оценка влияния реологических характеристик нефти и климатических факторов на процесс образования АСПО. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и*

углеводородного сырья. 2023;(3-4):28–35. https://doi.org/10.24412/0131-4270-2023-3-4-28-35
Khasanov I.I., Shakirov R.A., Kashirina D.A. Modeling and characterization of the waxing process of main oil pipelines. Part 2. Evaluation of the influence of oil rheological characteristics and climatic factors on the process of asphalts, resins, and paraffins deposits formation. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya = Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons.* 2023;(3-4):28–35. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/0131-4270-2023-3-4-28-35

11. Козырев Н.Б. Преимущества выделения профилеметрии внутрипромысловых нефтепроводов в отдельный бизнес-процесс. *Экспозиция Нефть Газ.* 2016;(7):92–93.
Kozyrev N.B. Preimushchestva vydeleniya profilemetrii vnutripromyslovykh nefteprovodov v otdel'nyi biznes-protsess. *Ekspozitsiya Neft' Gaz = Exposition Oil Gas.* 2016;(7):92–93. (In Russ.).
12. Ревель-Муроз П.А., Гильмутдинов Н.Р., Дмитриев М.Е., Мастобаев Б.Н. Использование асфальтосмолопарафиновых отложений в качестве тепловой и антикоррозионной изоляции нефтепроводов. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья.* 2016;(3):12–16.
Revel"-Muroz P.A., Gil"mutdinov N.R., Dmitriev M.E., Mastobaev B.N. Using of asphaltene deposits as a heat and corrosion insulation of oil pipelines. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya = Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2016;(3):12–16. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Хасанов Ильнур Ильдарович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Анализа данных и машинного обучения, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация.
e-mail: iikhasanov@fa.ru
ORCID: 0000-0002-3422-1237

Ilnur I. Khasanov, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor Department of Data Analysis and Machine Learning, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, the Russian Federation.

Шакиров Руслан Азатович, аспирант, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Российская Федерация.
e-mail: rshakirov.02@gmail.com

Ruslan A. Shakirov, Postgraduate Student, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 21.05.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 11.06.2024.

The article was submitted 21.05.2024; approved after reviewing 05.06.2024; accepted for publication 11.06.2024.