

doi: 10.51639/2713-0576_2026_6_3_56

Научная статья

УДК 621.642

ГРНТИ 73.37.19

ВАК 2.8.5

Применение комплексного подхода для повышения энергоэффективности магистральных нефтепроводов

Артем Олегович Колбасов*, Вячеслав Александрович Татаринцев
ФГБУ ВО «Брянский государственный технический университет»,
Россия, Брянск

* vatat52@gmail.com

Аннотация

Отмечено, что процесс перекачки нефти по магистральным трубопроводам остаётся энергоёмкостью технологической операцией. Целью работы является повышение эффективности работы магистрального трубопровода транспорта нефти за счёт внедрения энергосберегающих и ресурсосберегающих технологий. Выполнен сравнительный анализ методов повышения энергоэффективности, произведены необходимые расчёты и предложено комплексное техническое решение, позволяющее достичь наилучших показателей по энергосбережению и надёжности системы транспорта нефти.

Ключевые слова: энергоэффективность, магистральный нефтепровод, частотно-регулируемый привод, противотурбулентная присадка, внутритрубная очистка, гидравлическое сопротивление.

Магистральные нефтепроводы (МН) в России являются основным средством транспортировки нефти. Около 85 % всей нефти в стране транспортируется именно этим способом. В последнее время снижение объёмов перевозок нефти по железной дороге и внутренним водным путём, что связано с перераспределением грузопотоков и увеличением доли трубопроводного транспорта. Поэтому МН остаются ключевым элементом транспортной инфраструктуры России, обеспечивая эффективную и надёжную доставку нефти от мест добычи до потребителей.

Одной из основных проблем при эксплуатации магистральных трубопроводов транспорта нефти остаётся высокая энергоёмкость процессов перекачки. Большая часть энергии расходуется на работу насосного оборудования, и значительные потери могут возникать из-за неэффективного регулирования, износа оборудования и гидравлических сопротивлений. Кроме того, цикличная работа насосов и неравномерные нагрузки снижают срок службы элементов системы и увеличивают вероятность аварий. Поэтому актуальность приобретают современные технические решения, направленные на повышение энерго- и ресурсосбережения. К таким решениям относятся частотно-регулируемые приводы (ЧРП), применение противотурбулентных присадок (ПТП), а также регулярная внутритрубная очистка. Все эти методы позволяют не только сократить энергозатраты, но и продлить срок службы оборудования, улучшить гидравлические параметры системы и повысить её надёжность.

Исследованиями [1 - 3] установлено, что внедрение частотно-регулируемого привода (ЧРП) является наиболее эффективным способом повышения общей энергоэффективности системы магистральных нефтепроводов. Применение ЧРП позволяет снизить расход электроэнергии на перекачку более чем на 18 %, а также значительно увеличить межремонтные интервалы электродвигателей и трубопроводов [4]. За счёт сокращения количества пусков, стабилизации режима работы насосных агрегатов и уменьшения амплитуды колебаний давления срок службы оборудования увеличивается в среднем в 2,2 раза.

Однако для дальнейшего увеличения ресурсо- и энергосбережения целесообразно дополнительно использовать противотурбулентные присадки (ПТП). Применение ПТП способствует стабилизации потока нефти, снижению гидравлических сопротивлений и, как следствие, дополнительному сокращению энергозатрат. Следует отметить, что интеграция ПТП требует дополнительных расходов на закупку и введение присадки, что увеличивает стоимость проекта. Тем не менее, комплексное применение ЧРП и ПТП позволяет добиться максимального повышения эффективности работы трубопроводной системы и насосных агрегатов.

Совместное применение ЧРП и ПТП обеспечивает не только снижение энергозатрат, но и уменьшение потерь давления в системе, что особенно важно на длинных участках магистрали. Однако при объединении ЧРП и ПТП возникает проблемы координации их работы. К ним относятся:

- ПТП без интеллектуального управления подаётся либо по фиксированному графику, либо вручную оператором;
- такая подача не учитывает текущие параметры потока – расход, вязкость, температуру, давление.

В условиях колебаний производительности, температуры нефти, сезонных изменений, режим постоянного дозирования ПТП может привести к:

- перерасходу дорогостоящей присадки;
- отсутствию эффекта от дозирования в неподходящие моменты;
- дисбалансу между режимами насоса и гидравликой трубопровода.

Чтобы ЧРП и ПТП работали как единая система, требуется комплексное автоматизированное управление. Эту функцию выполняет SCADA-система как центральное звено в системе управления [5]. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – программно-аппаратный комплекс сбора данных и диспетчерского контроля, используемый для мониторинга и управления технологическими процессами. SCADA-система объединяет:

- частотно-регулируемые приводы (ЧРП);
- насос-дозаторы ПТП;
- систему датчиков (давление, температура, расход, вязкость);
- операторский интерфейс и архив.

С помощью SCADA-система реализуется адаптивный алгоритм, в ходе которого в реальном времени опрашиваются датчики, установленные на участке:

- давление (PD);
- температура (TD);
- расход (FQ);
- (опционально) вязкость.

На основе показаний определяет характеристики потока:

- если температура низкая, то вязкость увеличивается;
- если расход высокий, то усиливается турбулентность;

— если давление на выходе растёт, то возможны повышенные потери.

SCADA-система анализирует необходимость дозирования ПТП:

— при высоких потерях давления и повышенной вязкости система активирует насос-дозатор;

— при нормализации параметров — отключает дозирование.

Одновременно система регулирует частоту вращения насоса через ЧРП, чтобы:

— обеспечить нужный расход при минимальной затрате электроэнергии;

— поддерживать стабильное давление.

Связь между ЧРП и ПТП:

— если ЧРП увеличивает частоту (увеличивается расход), то SCADA-система автоматически увеличивает дозу ПТП;

— если ЧРП снижает частоту (падает производительность), то SCADA-система пропорционально снижает подачу ПТП.

Таким образом, дозирование и работа насоса находятся в прямой зависимости друг от друга. ЧРП и ПТП работают синхронно, а управление ими происходит централизованно [5]. Это позволяет избежать перерасхода присадки, снизить нагрузку на насосы, обеспечить стабильные параметры перекачки.

Выполним расчёт эффективности частотного привода и противотурбулентных присадок как единой системы под управлением SCADA-системы

Примем, что энергия до внедрения (базовая): $E_0 = 100 \%$, ЧРП снижает энергопотребление на $E_1 \%$, ПТП снижает энергопотребление на $E_2 \%$ от первоначального значения

Тогда остаточная энергия после ЧРП

$$E_{\text{ЧРП}} = 1 - E_1.$$

Оставшееся энергопотребление после ПТП применяется к результату после ЧРП, а не к исходному уровню

$$E_{\text{ост}} = E_{\text{ЧРП}} \cdot (1 - E_2)$$

Тогда итоговая экономия:

$$E_{\text{сумм}} = 1 - (1 - E_1) \cdot (1 - E_2).$$

Снижение от ЧРП $E_1 = 28308/335000 = 0,08$; снижение от ПТП

$$E_2 = \frac{17523}{335000} = 0,05$$

Суммарная эффективность

$$E_{\text{сумм}} = 1 - (1 - 0,08) \cdot (1 - 0,05) = 1 - 0,8165 \cdot 0,9539 = 0,126 \text{ или } 12,6 \%.$$

Для дальнейшего повышения энерго- и ресурсоэффективности целесообразно дополнительно использовать противотурбулентные присадки (ПТП). Добавление ПТП позволяет снизить коэффициент гидравлического сопротивления потока до 17,6 %, что дополнительно сокращает энергопотребление на 4...5 %. Влияние ПТП на ресурс

оборудования проявляется в снижении вибраций и внутренних нагрузок в насосах и трубопроводах, что может привести к увеличению межремонтных интервалов примерно на 5...7 % относительно базового уровня эксплуатации без присадок.

Применение ПТП требует дополнительных эксплуатационных затрат на закупку и дозирование присадки, что увеличивает стоимость эксплуатации участка. Однако комплексное использование ЧРП и ПТП обеспечивает максимальное снижение энергозатрат, повышение надёжности системы и продление срока службы оборудования, что делает данный вариант наиболее эффективным с технической точки зрения.

Схема работы НПА с частотным приводом в совокупности с противотурбулентными присадками под управлением системы SCADA показана на рисунке 1.

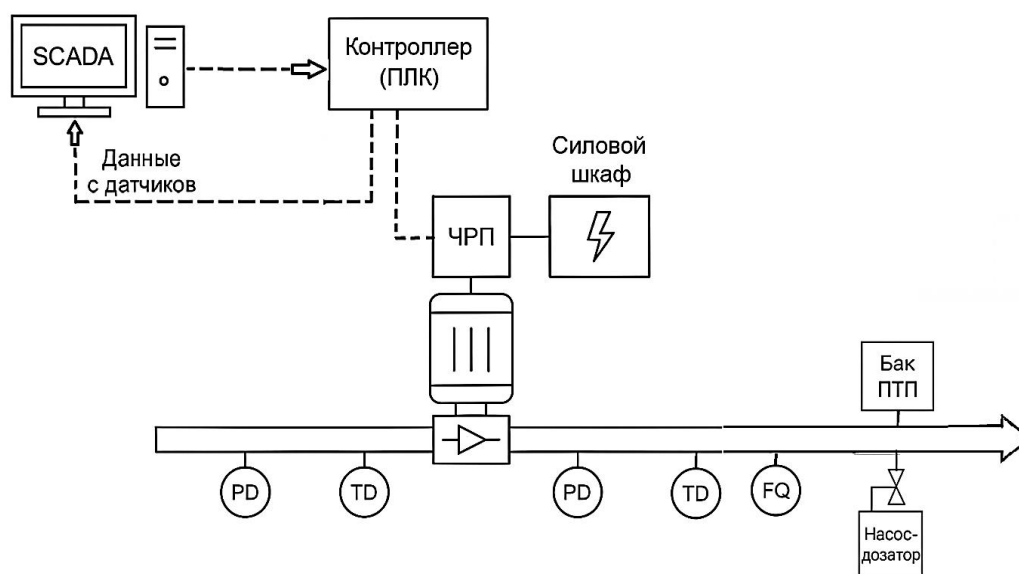


Рисунок 1 – Схема работы НПА с частотным приводом в совокупности с противотурбулентными присадками под управлением системы SCADA [5]

1. Основная линия трубопровода:
 - горизонтальная стрелка показывает направление потока транспортируемой среды (нефти) по магистральному трубопроводу – слева направо;
 - на трубопроводе установлены датчики:
 - PD — датчики давления (*Pressure Detector*), установлены до и после насоса для контроля перепада давления;
 - TD — датчики температуры (*Temperature Detector*), позволяют отслеживать изменение вязкости среды;
 - FQ — датчик расхода (*Flow Quantity*), определяет объем перекачиваемой жидкости.
 2. Насосный агрегат с частотно-регулируемым приводом (ЧРП):
 - в центре схемы изображён магистральный насос, соединённый с электродвигателем;
 - питание электродвигателя осуществляется через частотно-регулируемый привод (ЧРП).
- ЧРП управляет частотой вращения двигателя, обеспечивая:
- поддержание нужного расхода и давления;

- снижение энергозатрат за счёт адаптации режима работы под фактические условия.

3. Силовой шкаф и контроллер (ПЛК):

- силовой шкаф обеспечивает питание ЧРП;
- ПЛК (программируемый логический контроллер) управляет ЧРП и насос-дозатором на основе сигналов с датчиков.

Связь между SCADA и ПЛК осуществляется по промышленному протоколу (например, *Modbus TCP/IP*).

ПЛК обменивается данными с:

- датчиками (*PD, TD, FQ*);
- ЧРП;
- насос-дозатором ПТП.

Пунктирные линии обозначают сигнальные линии – обмен данными и командами управления.

4. Система подачи противотурбулентных присадок (ПТП).

В правой части схемы изображена система дозирования ПТП, которая состоит из:

- бака ПТП – ёмкости с присадкой;
- насоса-дозатора – устройства, которое подаёт присадку в трубопровод в нужный момент.

Подача ПТП осуществляется после насоса, так как при прохождении через насос присадка теряет эффективность. Насос-дозатор получает команды от ПЛК, который решает, когда и в каком объёме подавать присадку — в зависимости от давления, температуры и расхода.

5. SCADA-система.

В левой части схемы – операторская станция SCADA, которая выполняет следующие действия:

- получает данные с датчиков (через ПЛК);
- отображает параметры в реальном времени;
- позволяет оператору управлять режимом работы насосов и дозаторов;
- архивирует данные и фиксирует аварийные события.

SCADA-система передаёт команды ПЛК для изменения частоты ЧРП и включения дозатора ПТП при необходимости.

Итоговая работа схемы:

- контроллер ПЛК является центром локального управления: он анализирует данные с датчиков и управляет оборудованием;
- SCADA – «мозг» всей системы, обеспечивает централизованный контроль, визуализацию и оптимизацию.

В нормальных условиях SCADA совместно с ПЛК:

- регулируют скорость насоса через ЧРП;
- управляют дозированием ПТП;
- обеспечивают энергоэффективную и устойчивую работу магистрального участка трубопровода.

Состав схемы магистрального нефтепровода с внедренным частотным приводом и дозатором противотурбулентных присадок в единую систему под управлением SCADA-системы представлен в таблице 1.

Оценим изменения межремонтных интервалов на ремонт трубопроводов при внедрении комплексного технического решения. Одним из критически важных аспектов эксплуатации магистральных нефтепроводов является обеспечение надёжности

Таблица 1 – Состав схемы нефтепровода в единой системе под управлением SCADA [5, 8]

Элемент	Наименование	Основные характеристики	Стоимость
Насос	НМ 10000×210	$Q = 1\,0\,000 \text{ м}^3/\text{сут}$, $H=210 \text{ м}$	Замена не требуется – уже в составе
Электродвигатель	СТД-8000-2РУХЛ4	8000 кВт, 3000 об/мин, 6 кВ	Замена не требуется – уже в составе
ЧРП	ПЧВ-8000-6	8000 кВт, 6 кВ, векторное управление	≈25 млн. руб за 1 устройство
Датчик давления (PD)	ДД1000П-Р-Exd	До 10 МПа, Exd-взрывозащита	2 шт. на станцию (вход/выход) ≈ 45 000 руб/шт.
Датчик температуры (TD)	ТСП-0879	От -40 до +200 °С	ТСП-0879 – 2 шт./станция ≈ 8 000 руб/шт.
Расходомер (FQ)	ПРЭМ-2	Ультразвуковой, до 12000 м³/сутки	ПРЭМ-2 (ультразвуковой) ≈ 300 000 руб/шт
SCADA	«КРУГ-2000» (Россия)	Российская SCADA-платформа, Modbus, архив, визуализация	≈ 12 млн руб

трубопроводной системы и продление срока её безопасного функционирования. Особенно это актуально в условиях циклического режима перекачки, при котором насосные станции работают с переменным числом включений (отключений) агрегатов [6, 7].

Влияние циклического режима на состояние трубопровода. При работе насосных станций в циклическом режиме происходят регулярные колебания давления на входе и выходе. Эти колебания вызывают переменные механические напряжения в стенках трубопровода. При незначительных амплитудах такие нагрузки могут быть безопасны. Однако в условиях высоких перепадов давления существует риск формирования микротрещин. Со временем эти дефекты могут прогрессировать, сокращая ресурс трубы и повышая вероятность аварийных ситуаций.

Статистические данные показывают, что более 30 % повреждений приходится на участки, проработавшие свыше 20 лет.

Основной причиной служит накопление усталостных повреждений в материале. В этой связи стабилизация режима работы насосных агрегатов является важным фактором повышения надёжности.

Воздействие ЧРП на нагрузочный режим трубопровода. Применение частотно-регулируемых приводов (ЧРП) позволяет устранить или существенно снизить амплитуду давления в трубопроводе.

Постоянный режим перекачки снижает количество пусков и остановок насосов, а следовательно – и число циклов нагружения труб. Это замедляет развитие усталостных дефектов.

Согласно положениям РД-23.040.00-КТН-265-10, безопасный срок эксплуатации участка трубопровода определяется по формуле:

$$T_A = \frac{N_{\min} \cdot k}{N_g \cdot n},$$

где $N_{\min}$ – число циклов до возникновения трещины; N_g – годовая цикличность нагружения; N – коэффициент запаса прочности, $N = 10$; k – коэффициент долговечности, зависящий от условий эксплуатации.

Сравнение сроков службы при внедрении и без ЧРП. Если трубопровод эксплуатируется без ЧРП, в формуле используется фактическое значение цикличности нагружения за последний отчётный период

$$T_{A.Ф.} = \frac{N_{\min} \cdot k}{N_{\phi} \cdot n}.$$

При использовании ЧРП используется аналогичная формула, но с замененого параметра цикличности:

$$T_{A.ЧРП} = \frac{N_{\min} \cdot k}{N_{ЧРП} \cdot n}.$$

При одинаковых значениях $N_{\min}$, k и n из формул следует

$$\frac{T_{A.ЧРП}}{T_{A.Ф.}} = \frac{N_{\phi}}{N_{ЧРП}}.$$

Отношение $T_{A.ЧРП}/T_{A.Ф.}$ – представляет собой коэффициент $k_{Б.Э.}$. Отсюда примем исходя из прошлых расчетов что $k_{с.ц} \approx 2,2$; следовательно:

$$k_{Б.Э.} = k_{с.ц} = 2,2$$

$$\frac{T_{A.ЧРП}}{T_{A.Ф.}} = 2,2; \quad T_{A.ЧРП} = 2,2T_{A.Ф.}$$

Срок эксплуатации участка трубопровода при внедрении ЧРП может быть увеличен примерно в 2,2 раза по сравнению с базовым циклическим режимом.

Связь межремонтных интервалов с безопасным сроком эксплуатации.

Межремонтные интервалы напрямую связаны с долговечностью трубопровода. Если обозначить: T – рассматриваемый временной интервал (например, 10 лет); $T_{МР.Ф.}$ – средний межремонтный интервал при циклической работе (без ЧРП); $T_{МР.ЧРП}$ – межремонтный интервал при работе с ЧРП, то количество ремонтов трубы за период можно определить, как

$$n_{p1} = \frac{T}{T_{МР.Ф.}} \text{ (без ЧРП)}, \quad n_{p2} = \frac{T}{T_{МР.ЧРП}} \text{ (с ЧРП)}.$$

Поскольку межремонтный интервал пропорционален сроку безопасной эксплуатации, то

$$\frac{T_{\text{МР.ЧРП}}}{T_{\text{МР.Ф}}} = \frac{T_{\text{А.ЧРП}}}{T_{\text{А.Ф}}} = k_{\text{С.Ц}},$$

подставляя это соотношение, находим

$$n_{p2} = \frac{n_{p1}}{k_{\text{С.Ц}}} = \frac{T}{T_{\text{МР.Ф}} \cdot k_{\text{С.Ц}}}.$$

Количество ремонтов участка трубопровода за определённый период эксплуатации снижается прямо пропорционально коэффициенту снижения цикличности нагружения.

При $k_{\text{С.Ц}} = 2,2$ число ремонтных операций также сокращается в 2,2 раза, что приводит к снижению затрат на обслуживание и повышает надёжность системы в целом [7].

Таким образом, предложенное комплексное техническое решение позволяет не только сократить энергозатраты, но и продлить срок службы оборудования, улучшить гидравлические параметры системы и повысить её надёжность.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что на момент подачи статьи в редакцию, у них нет возможного конфликта интересов с третьими лицами.

Список источников:

1. Артющкин В.Н., Тянь В.К. Энергосбережение при эксплуатации магистральных насосных агрегатов: учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 112 с.
2. Коршак А.А. Ресурс- и энергосбережение при транспортировке и хранении углеводородов: учебное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс, 2016. 410 с.
3. Самолёнков С. В., Кабанов О. В. Исследование способов энергосбережения при транспорте нефти // Записки Горного института. 2012. Т. 195. С. 81-84.
4. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Калимгулов А.Р. Ревель-Муроз П.А. Оценка эффективности применения ЧРП на объектах магистральных нефтепроводов по снижению расхода электроэнергии // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 1. № 14. С. 130-138.
5. Белоглазов И.И. Совершенствование автоматизации процессов нефтепереработки с использованием SCADA-системы genesis // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 4-2 (23). С. 9-11.
6. Татаринцев В.А. Анализ рисков и обоснование уровня надёжности элементов трубопроводного транспорта // Нефтегазовый терминал: сборник научных трудов международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малюшина; под общей редакцией М.А. Александрова. Тюмень, 2021. С. 171-178.
7. Татаринцев В.А., Васильев А.В. Обоснование рационального уровня надёжности элементов трубопроводного транспорта // Нефтегазовый терминал. Материалы международной научно-технической конференции. Тюмень. 2022. С. 202-207.

8. Давыдов О.А., Коломыцев Н.В. Разработка системы диспетчерского контроля и сбора данных с установок нефтеперекачивающих станций // Вестник ТОГУ. 2023. № 3 (70). С. 89-98.

Applying a comprehensive approach to improve the energy efficiency of main oil pipelines

Artem Olegovich Kolbasov*, Vyacheslav Aleksandrovich Tatarintsev
Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

* vatat52@gmail.com

Abstract

This article notes that pumping oil through trunk pipelines remains an energy-intensive process operation. The aim of this study is to improve the efficiency of trunk oil pipelines through the implementation of energy-saving and resource-saving technologies. A comparative analysis of energy efficiency improvement methods was conducted, the necessary calculations were performed, and a comprehensive technical solution was proposed to achieve the best energy conservation and reliability of the oil transportation system.

Keywords: energy efficiency, trunk oil pipeline, variable frequency drive, drag reducing agent, in-line cleaning, hydraulic resistance.