

## МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ И МЕТОДЫ БОРЬБЫ С АСФАЛЬТЕНО-СМОЛИСТО-ПАРАФИНОВЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ В НЕФТЕПРОМЫСЛОВОМ ОБОРУДОВАНИИ

*проф. А. Н. ГУРБАМЕНОВ, докторант Дж. Р. АЛИЕВ*

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,  
Баку, Азербайджан*

**Аннотация.** В статье рассматриваются механизмы образования асфальтено-смолисто-парафиновых отложений (АСПО) в нефтепромысловом оборудовании и анализируются современные методы их предупреждения и удаления. АСПО представляют собой сложные коллоидно-дисперсные системы, состоящие из асфальтенов, смол, парафинов, карбенов, карбонидов, а также минеральных и механических примесей. Эти отложения образуются при изменении давления и температуры пластовой нефти, приводящих к выпадению твердых компонентов и адсорбции их на поверхности оборудования и трубопроводов. Установлено, что традиционные методы, основанные на термической обработке – промывке горячей нефтью, паром и водой, – малоэффективны при эксплуатации глубоких и высокопарафиновых скважин. В связи с этим особое внимание уделяется химическим методам, включающим применение ингибиторов парафиноотложений, депрессорных и диспергирующих добавок, а также поверхностно-активных веществ (ПАВ), способных предотвращать агрегацию асфальтенов и улучшать текучесть нефти. Проведен анализ химического состава АСПО, рассмотрены физико-химические закономерности их образования, структурно-механические характеристики и адгезионные свойства. В заключение показано, что разработка новых реагентов на основе синергетических принципов – одно из наиболее перспективных направлений повышения эффективности нефтедобычи и защиты оборудования от осложнений, связанных с АСПО.

**Ключевые слова:** асфальтены, смолы, парафины, ингибиторы, депрессоры, поверхностно-активные вещества, нефтепромысловое оборудование, кольцевое пространство, зона призабойной области.

**Введение.** Одной из наиболее сложных проблем при эксплуатации нефтяных скважин, особенно в условиях добычи высокопарафиновых нефтей, является образование асфальтено-смолисто-парафиновых отложений (АСПО). Эти отложения формируются в процессе добычи, транспорта и хранения нефти и оказывают значительное влияние на производительность скважин, надежность оборудования и экономические показатели нефтедобывающих предприятий.

Феномен образования АСПО обусловлен изменением термобарических условий – снижением давления и температуры при подъеме нефти на поверхность. В результате происходит выпадение из нефти труднорастворимых компонентов: парафинов, смол, асфальтенов, а также мелкодисперсных механических примесей. Эти вещества оседают на внутренних стенках насосно-компрессорных труб, манифольдов и другого оборудования, образуя плотные слои с высокой адгезией к металлу.

Согласно современным исследованиям (Papadimitriou, Romanos, 2007; Rogel, Ovalles, 2016), процесс отложения АСПО представляет собой сложное сочетание физико-химических и коллоидных явлений. Основными факторами, влияющими на их образование, являются:

1. *Снижение температуры нефти* при движении по стволу скважины;
2. *Давление насыщения газа* и растворимость твердых углеводородов;

3. *Состав нефти* – содержание высокомолекулярных парафинов, смол и асфальтенов;
4. *Гидродинамические условия потока* – скорость, турбулентность, градиент сдвига;
5. *Характеристики поверхности труб* – шероховатость, смачиваемость и теплопроводность.

В Азербайджане, где значительная часть добываемых нефтей относится к парафинистым, проблема АСПО особенно актуальна. По данным Азнефти (Qurbanov, Əlsəfərova, 2005), в скважинах, эксплуатирующих месторождения Апшеронского полуострова, интенсивные отложения парафина наблюдаются на глубинах 800–1200 м, где традиционные термические методы становятся малоэффективными. В этих условиях ключевую роль начинают играть *химические методы*, основанные на применении *ингибиторов, депрессоров и комплексных реагентов*, позволяющих не только предотвращать осаждение АСПО, но и улучшать реологические свойства нефти.

Цель данной работы – провести всесторонний анализ механизмов образования АСПО и оценить эффективность существующих технологий борьбы с ними, с особым вниманием к химическим реагентам нового поколения, разработанным на синергетических принципах.

### **Основная часть**

**1. Механизм образования АСПО.** АСПО представляют собой многофазную систему, включающую молекулярно-дисперсные, коллоидные и грубодисперсные компоненты. Главными структурными элементами являются асфальтены, смолы и парафины. При снижении температуры ниже точки начала кристаллизации парафинов (WAT – Wax Appearance Temperature) начинается выпадение твердых частиц, которые служат центрами кристаллизации. На ранней стадии эти микрокристаллы объединяются с полярными компонентами нефти – смолами, органическими кислотами, асфальтенами, образуя первичный адсорбционный слой на поверхности труб (Rogel, Ovalles, 2016).

Механизм можно условно разделить на три стадии:

1. *Адсорбция полярных компонентов* – смол и асфальтенов на металлической поверхности.
2. *Кристаллизация парафинов* – образование тонкого аморфного слоя (< 0,1 мм) высокой вязкости.
3. *Рост и уплотнение отложений* – присоединение суспендированных частиц, солей и капель воды.

Особенность АСПО заключается в их структурной неоднородности. Исследования микроструктуры показывают существование двух типов отложений (Sousa, Matos, Guerreiro, 2019):

- *Тип I* – полидисперсные суспензии твердых частиц в нефти;
- *Тип II* – обратные эмульсии типа «вода-в-нефти», где капли воды закреплены в плотном органическом матриксе.

Отложения типа II обладают значительно большей механической прочностью и труднее удаляются как термическими, так и химическими способами.

Минеральная составляющая АСПО представлена частицами породы, оксидами металлов, органометаллическими соединениями. Приближаясь к поверхности металла, концентрация карбенов, карбонидов и минеральных веществ увеличивается, что объясняется каталитическим эффектом металла (Papadimitriou, 2007). Это приводит к формированию «переходного слоя», отличающегося высокой адгезией и низкой растворимостью.

**2. Влияние условий эксплуатации.** Формирование АСПО тесно связано с изменением геотермического градиента вдоль ствола скважины. При разнице температур более 100 °С (Sousa et al., 2019) интенсивность парафинообразования резко возрастает. Давление, тип коллектора и литологические особенности пород (песчаники, карбонаты) определяют преобладание либо смолистых, либо асфальтеновых компонентов (Kang, Lee, Lim, 2014).

В скважинах с низким дебитом и высоким содержанием воды образуются стойкие эмульсии, что способствует стабилизации АСПО и усложняет их удаление (El-Dalatony et al., 2019). Гидродинамические параметры потока – скорость, турбулентность, вязкость нефти – определяют толщину и характер отложений. При низких скоростях формируется равномерный слой, при высоких – наблюдается частичное отслаивание, но общий объем отложений не уменьшается.

**3. Методы борьбы с АСПО.** Методы можно разделить на четыре основные группы:

1. *Механические* – скребки, щетки, магнитные ловушки. Эффективны в верхней части ствола, но требуют остановки скважины.

2. *Термические* – циркуляция горячей нефти, воды или пара. Эффективность ограничена глубинами до 500 м.

3. *Физико-химические* – применение ультразвука, магнитных и электрических полей.

4. *Химические* – использование реагентов-ингибиторов, растворителей, депрессоров и диспергаторов.

Наиболее перспективным направлением является *комплексное химическое воздействие*. В Азербайджанской практике (Ibrahimov, Naibova, 2007; Ağayev, Grebnev, 2009) применяются реагенты, включающие депрессорные и поверхностно-активные компоненты. Эти составы снижают температуру застывания нефти, улучшают ее текучесть и предотвращают агрегацию парафиновых кристаллов.

Примером является реагент *ПКИ*, который снижает температуру застывания нефти с 26,4 °С до 12,8 °С и увеличивает межремонтный период в 2,5–3 раза. Другие составы, включающие ациламидные и карбоксильные группы (Mukkatala, 2006), обеспечивают не только диспергирование асфальтенов, но и коррозионную защиту.

Среди эффективных растворителей выделяется *реагент А-98* – смесь пиролизных и газоконденсатных растворителей, содержащих до 99 % ароматических соединений (в том числе 50 % ксилола). Благодаря высокой растворяющей способности он обеспечивает полное удаление АСПО при минимальном объеме промывки.

Для очистки оборудования и трубопроводов также используются композиции на основе циклогексановых фракций, таллового масла, тонкодисперсных гидрофобных материалов и ингибиторов накипеобразования. Их техническое преимущество заключается в сочетании растворяющего, диспергирующего и стабилизирующего эффектов.

**4. Перспективные направления.** Современные тенденции указывают на необходимость *разработки многофункциональных реагентов*, сочетающих депрессорные, ингибирующие, антикоррозионные и деэмульгирующие свойства. Наиболее перспективными считаются композиции, действующие по *синергетическому принципу*, когда совокупный эффект смеси превышает сумму эффектов отдельных компонентов.

Другим направлением является *использование нанодобавок* (оксиды металлов, нанокремнезем), которые усиливают адсорбционные свойства ингибиторов и повышают устойчивость дисперсий. Кроме того, ведутся исследования по созданию *биоразлагаемых реагентов*, не оказывающих отрицательного воздействия на окружающую среду.

Экспериментальные данные показывают, что применение химических ингибиторов позволяет сократить количество парафиноотложений на 25–30 % (Van Der Gest, Guersoni, 2018), а также снизить энергозатраты на добычу и транспорт нефти.

**Заключение.** Проведенный анализ подтверждает, что борьба с асфальтено-смолисто-парафиновыми отложениями является одной из ключевых задач современной нефтедобычи. Несмотря на разнообразие методов, *наиболее эффективным направлением* остается применение *химических реагентов*, способных регулировать процессы кристаллизации и адгезии парафинов, стабилизировать коллоидную систему нефти и предотвращать выпадение твердых фаз.

Развитие технологий должно идти в сторону *комплексных синергетических составов*, включающих депрессоры, диспергаторы, ингибиторы коррозии и деэмульгаторы. Важным является учет коллоидно-химических свойств нефти, водосодержания и характера поверхности оборудования.

В перспективе совершенствование методов борьбы с АСПО позволит не только повысить коэффициент нефтеотдачи пластов, но и значительно снизить эксплуатационные затраты, увеличить межремонтные интервалы и обеспечить устойчивую работу нефтепромыслового оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Adeyanju A.O. et al. Experimental Study of Wax Deposition in Single Phase Sub-cooled Oil Pipelines. SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Lagos, 2013.
2. Ağayev S.G., Grebnev A.N., Gurova A.A. Ингибирование химическими реагентами АСПО Вингапуровского и Аганского месторождений. Изв. Вузов, 2009, № 1, с. 55–61.
3. Demirbas A. Deposition and flocculation of asphaltenes from crude oils. Petroleum Science and Technology, 2016, vol. 34, p. 6–11.
4. El-Dalatony M., Jeon B.-H., Salama E.-S. Occurrence and Characterization of Paraffin Wax Formed in Developing Wells and Pipelines. Energies, 2019, 12, 967.
5. Gabetov G.Kh. et al. Состав для удаления асфальто-смолистых и парафиновых отложений. RU 2261887 C1, 2005.
6. Huang Z., Zheng S., Fogler H.S. Wax Deposition: Experimental Characterizations, Theoretical Modeling, and Field Practices. CRC Press, 2015.
7. Ibrahimov A.Dzh., Naibova T.M., Mamedov K.G. Исследование применения ацетамид-фенолформальдегидного олигомера против АСПО. Изв. Вузов Азербайджан, 2007, № 6, с. 17–19.
8. Kang P., Lee D., Lim J. Status of Wax Mitigation Technologies in Offshore Oil Production. Busan, 2014.
9. Mukkamala R. Compounds containing amide and carboxyl groups as asphaltene dispersants in crude oil. US Patent 7122112B2, 2006.
10. Papadimitriou N., Romanos G.E., Charalambopoulou G.Ch. Experimental Investigation of Asphaltene Deposition Mechanism During Oil Flow in Core Samples. J. Petrol. Sci. Eng., 2007.
11. Qurbanov M.A., Əlsəfərova M.E., Qurbanov F.M. Азербайджанское нефтяное хозяйство, Баку, 2005, № 6, с. 38–40.
12. Rogel E., Ovalles C., Vien J. et al. Asphaltene Characterization of Paraffinic Crude Oils. Fuel, 2016.
13. Soto-Castruita E., Ramirez G., Martilnez C. Effect of the Non-Newtonian Behavior of Heavy Oils. Energy and Fuels, 2015.
14. Sousa A.L., Matos H.A., Guerreiro L.P. Preventing and Removing Wax Deposition Inside Vertical Wells. J. Petroleum Exploration and Production Technology, 2019.
15. Van Der Gest C., Guersoni V.C., Merino-Garcia D. et al. Deposition Experiment with Highly Paraffinic Crude Oil in Laminar Single-Phase Flow. Energy & Fuels, 2018.