МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПАДЕНИЯ АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ С ПОКРЫТИЕМ И БЕЗ НА ЛАБОРАТОРНОМ ЦИРКУЛЯЦИОННОМ СТЕНДЕ

MODELING OF ASPHALT-RESIN-PARAFFIN DEPOSITION ON THE INNER SURFACE OF TUBING PIPES WITH AND WITHOUT COATING AT A LABORATORY CIRCULATION BENCH

П. Е. Юдин
Pavel E. Yudin

Самарский государственный
технический университет,
ООО «НПЦ «Самара»,
г. Самара, Российская Федерация

Samara State Technical University,
Scientific and Production Center
«Samara» LLC,
Samara, Russian Federation

М. В. Богатов
Maxim V. Bogatov

Самарский государственный
технический университет,
ООО «НПЦ «Самара»,
г. Самара, Российская Федерация

Samara State Technical University,
Scientific and Production Center
«Samara» LLC,
Samara, Russian Federation

В связи с переходом нефтяной промышленности на позднюю стадию разработки месторождений нефтяная отрасль сталкивается с проблемой возникновения асфальтосмолопарафиновых отложений на внутренней поверхности насосно-компрессорных труб.

В данной работе представлена вниманию циркуляционная установка, имитирующая условия эксплуатации насосно-компрессорных труб, извлекающих нефтяной флюид из пласта.

Были проведены испытания с двумя сегментами насосно-компрессорных труб, один из которых был с внутренним порошковым эпоксидным покрытием, другой сегмент без покрытия. В ходе эксперимента оценивалось количество выпавших асфальтосмолопарафиновых отложений при различных температурах охлаждения образцов. Выбор режимов испытаний определялся техническими характеристиками циркуляционного стенда, а также близостью к условиям добычи нефти на скважинах, осложненных асфальтосмолопарафиновыми отложениями.

Получена зависимость количества выпадения асфальтосмолопарафиновых отложений от градиента температуры, которая носит логарифмический характер. Установлено, что данная зависимость обусловлена только термодинамическим вкладом слоя асфальтосмолопарафиновых отложений и не зависит от состояния внутренней поверхности (шероховатости и поверхностной энергии), что противоречит результатам промысловых испытаний.

Due to the transition of the oil industry to a late stage of field development, the oil industry is faced with the problem of asphalt-resin-paraffin deposits on the inner surface of the tubing.

This paper presents a circulation bench simulating the operating conditions of tubing that extract oil fluid from the formation.

Tests were carried out with two tubing segments, one with an internal epoxy powder coating, the other uncoated. In the course of the experiment, the amount of precipitated asphalt-resin-paraffin deposits was estimated at different cooling temperatures of the samples.

The choice of test modes was determined by the technical characteristics of the circulation bench, as well as the proximity to the conditions of oil

Ключевые слова

асфальтосмолопарафиновые
отложения; насосно-
компрессорные трубы;
градиент температуры;
скорость потока; нефтяной флюид;
циркуляционный стенд;
слой отложений

Keywords

asphalt-resin-paraffin deposits;
tubing; temperature gradient;
flow rate; oil fluid; circulation stand;
sediment layer

production in wells complicated by asphalt-resin-paraffin deposits. The dependence of the amount of asphalt-resin-paraffin deposits on the temperature gradient, which is of a logarithmic nature, has been obtained. It was found that this dependence is due only to the thermodynamic contribution of the layer of asphalt-resin-paraffin deposits and does not depend on the state of the inner surface (roughness and surface energy), which contradicts the results of field tests.

Введение

В настоящее время нефтяная отрасль сталкивается с проблемой возникновения асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) на внутренней поверхности насосно-компрессорных труб (НКТ) все чаще из-за перехода нефтяной промышленности на позднюю стадию разработки месторождений. Данная проблема затрудняет подъем нефтяного флюида из пласта за счет уменьшения внутреннего сечения

труб вплоть до полного зарастания продуктами АСПО и остановки месторождения для дальнейших манипуляций по очистке колонны.

Борьба с АСПО предусматривает проведение мероприятий по двум направлениям [1, 2] (схема приведена на рисунке 1):

- методы предотвращающие отложения;
- методы удаления отложений.

Существуют методы, предупреждающие образования отложений. К ним относятся вну-

Рисунок 1. Схема мероприятий по предотвращению и удалению АСПО

тренные антикоррозионные покрытия (ВАКП). Безусловно, применение последних увеличивается с каждым годом как для промысловых трубопроводов (ПТ), так и для НКТ. Использование ВАКП началось в РФ в 90-х гг. XX века [3], и с тех пор объемы производства труб увеличиваются с каждым годом. Такой значительный рост обусловлен, в первую очередь, их высокой эффективностью для защиты от коррозии, однако, они оказались эффективными и против АСПО.

На многих месторождениях проводились промысловые испытания с НКТ, покрытыми ВАКП, которые неплохо себя зарекомендовали, но также есть и неудовлетворительный

опыт, приводящий к остановке извлечения нефтяного флюида из пласта и проведения очистных работ различными способами [4–8].

Для исключения образования АСПО на внутренней поверхности НКТ необходимо проанализировать причины возникновения данного физико-химического процесса и найти пути решения данной проблемы, которые смогли бы предотвращать отложения.

Есть большое количество факторов, способствующих образованию АСПО [1]:

- снижение давления на забое скважины и связанное с этим нарушение гидродинамического равновесия газожидкостной системы;
- интенсивное газовыделение;

- уменьшение температуры в пласте и стволе скважины;
- изменение скорости движения газожидкостной смеси и отдельных ее компонентов;
- состав углеводородов в каждой фазе смеси;
- соотношение объема фаз;
- состояние поверхности труб.

Расширение применения внутренних покрытий для предотвращения выпадения АСПО замедляется невозможностью на сегодняшний день достоверно моделировать и предсказывать поведение ВАКП в лабораторных условиях. Существующие методы, такие как метод холодного стержня [9, 10], разработаны для оценки свойств ингибиторов и не пригодны для образцов с покрытием.

Авторами был разработан экспериментальный лабораторный стенд, позволяющий моделировать условия выпадения АСПО, аналогичные происходящим в скважине. Принципиальная 3D модель циркуляционного стенда с силовыми агрегатами представлена на рисунке 2, а также на рисунке 3 представлен циркуляционный стенд.

Одной из причин начала образования АСПО является температура начала кристаллизации парафина, данный критерий был взят как основной в построении циркуляционной установки. Также важным фактором является следующий критерий: в колонне НКТ наружная часть трубы контактирует непосредственно с грунтом, который отличается от температуры добываемого флюида, таким образом возникает температурный градиент, яв-

ляющийся отправной точкой в образовании отложений на внутренней поверхности НКТ.

Принцип работы циркуляционной установки, изображенной на рисунке 2, заключается в следующем. Предварительно в стенд, общий вид которого представлен на рисунке 2, а, устанавливаются образцы с внутренним полимерным покрытием (в нашем случае с покрытием ПЭП-585) либо без него, в количестве от одного до четырех штук, после чего установка моделирует подъем нефтяного флюида в реальных условиях эксплуатации с заданной скоростью и температурой. На схеме установки образцов (рисунок 2, б) показана рубашка охлаждения, в которой задействован этиловый спирт в качестве хладагента. В сегментах труб предварительно просверливалось отверстие под термодатчик для контроля температуры; затем после установки образцов система наполнялась нефтяным флюидом в количестве 70 л, который является общим объемом системы. После наполнения и герметизации системы включался винтовой насосный агрегат 3 (рисунок 2, а), и в стенде запускается циркуляция флюида по следующей схеме: из нагревательной емкости 1 на рисунке 2, а горячий нефтяной флюид попадает в нижнюю часть системы для подачи на патрубки снизу вверх, тем самым моделируются условия эксплуатации на месторождении, затем после прохождения нефтяного флюида через патрубки он снова попадает в бак, где подогревается и циркулирует заново по той же схеме.

- а) 1 — емкость для подогрева и перекачки нефти; 2 — расположение испытуемых образцов;
3 — агрегат винтовой насосный BN031L01FYV; 4 — турель подачи нефти (снизу);
5 — приемная турель
- б) 1 — расположение датчиков температуры; 2 — внешняя поверхность образца;
3 — контур охлаждения

Рисунок 2. Циркуляционный стенд с силовыми агрегатами

Рисунок 3. Циркуляционный стенд, позволяющий моделировать условия при добыче нефтяного флюида из пласта в лабораторных условиях

Экспериментальная часть

Были проведены испытания с двумя сегментами НКТ 73 x 5,5 мм, длиной 150 мм, один из которых был с внутренним порошковым эпоксидным покрытием марки ПЭП-585, другой сегмент был без покрытия. В ходе эксперимента оценивалось количество выпавшего АСПО при различных температурах охлаждения образцов.

Выбор режимов испытаний определялся техническими характеристиками циркуляционного стенда, а также близостью к условиям добычи нефти на скважинах, осложненных АСПО. Параметры Тохл температуры охлаждения образцов варьировались от 0 °С до 25 °С с шагом в 5 °С, параметры скорости, температуры среды Тср и времени были постоянными и составляли 0,09 м/с, 25 °С, 15 ч соответственно. На рисунке 4 представлен экспериментальный график зависимости выпадения АСПО от изменения температуры ΔT ($\Delta T = T_{ср} - T_{охл}$).

Из графиков рисунка 4 видно, что при уменьшении температуры охлаждения наружной стенки НКТ масса выпавшего АСПО увеличивается, как в случае образца с покрытием,

Рисунок 4. Зависимость выпадения АСПО сегмента с покрытием (ПЭП-585) и без покрытия от изменения температуры

так и с образцом без покрытия. Экспериментальные данные аппроксимируются логарифмической зависимостью $y = 141,04 \ln(x) + 21,57$ с $R^2 = 0,96$. Разница в количестве АСПО, выпавшего на образце с покрытием и без, не превышает 11 %, что

противоречит результатам промысловых испытаний [9, 10], а также результатам, представленным в [11].

Авторами было сделано предположение, что количество АСПО в данном эксперименте зависит только от тепловых параметров си-

стемы, установившихся после выхода на стационарный режим. В связи с этим были сделаны следующие допущения:

— тепловой поток при всех режимах эксперимента постоянный;

— АСПО плотно прилегают к внутренней поверхности патрубков, не имеют пор, анизотропия отсутствует;

— коэффициенты теплопроводности λ для стали, эпоксидного покрытия, АСПО были взяты 46,5; 0,24; 0,13 Вт/(м °С) соответственно.

Руководствуясь формулой (1) и тем, что $Q = \text{const}$, получаем, что

$$Q = \frac{2\pi l \Delta T}{\left(\ln \frac{d_2}{d_1}\right) \frac{1}{\lambda_1} + \left(\ln \frac{d_3}{d_2}\right) \frac{1}{\lambda_2} + \left(\ln \frac{d_4}{d_3}\right) \frac{1}{\lambda_3}}, \quad (1)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — коэффициенты теплопроводности стали, эпоксидного покрытия и АСПО, Вт/(м °С); l — длина патрубка, мм; ΔT — изменение температуры наружной стенки и АСПО, °С; d_1, d_2, d_3, d_4 — диаметр наружной

стенки патрубка, диаметр внутренней стенки патрубка, диаметр образца вместе с покрытием, диаметр АСПО, мм.

Из (1) находим d_4 — диаметр АСПО, мм:

$$\ln \frac{d_4}{d_3} = \frac{2\pi \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \Delta T}{Q} - \ln \frac{d_2}{d_1} - \ln \frac{d_3}{d_2}. \quad (2)$$

Затем необходимо найти объем образовавшихся отложений и, исходя из этого, массу отложений на внутренней поверхности НКТ по формулам:

$$V = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_4^2) l; \quad (3)$$

$$m = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_4^2) l \rho, \quad (4)$$

где m — масса АСПО, отложившихся на внутренней поверхности НКТ, г; V — объем отложившихся АСПО, м³; ρ — плотность АСПО кг/м³; l — длина образца НКТ, мм.

Рисунок 5. Теоретический расчет зависимости выпадения АСПО образцов с покрытием и без от изменения температуры

Теоретическая зависимость массы АСПО от градиента температуры (рисунок 5) представляет собой логарифмическую зависимость $y = 134,19 \ln(x) + 122,4$.

Таким образом, зависимости, полученные на экспериментальном стенде и при проведении термодинамического расчета, в обоих случаях описываются логарифмическими уравнениями. Разница в теоретическом количестве выпавших АСПО связана только с на-

личием дополнительного термоизоляционного слоя, причем в данном случае не важно на внутренней или на внешней поверхности он будет находиться.

Выводы

Таким образом, из приведенных результатов испытаний и теоретических расчетов можно сделать следующие выводы.

1. Результаты, полученные на экспериментальной циркуляционной установке, говорят

о том, что при уменьшении температуры охлаждения наружной стенки сегмента НКТ происходит увеличение количества отложений на внутренней поверхности трубы, что подтверждает существующие теории.

2. Зависимость количества АСПО от градиента температуры (для заданных условий эксперимента) описывается уравнением ($y = 141,04\ln(x) + 21,57$ с $R^2 = 0,96$).

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маркин А.Н., Низамов Р.Э., Суховерхов С.В. Нефтепромысловая химия: практическое руководство. Владивосток: Дальнаука, 2011. 288 с.

2. Лозин Е.В., Шувалов А.В., Гарифуллин А.Ш. Повышение эффективности разработки нефтяных месторождений в завершающей стадии // Состояние и дальнейшее развитие основных принципов разработки нефтяных месторождений: сб. избранных ст., посвященных 50-летию деятельности ЦКР по УВС. М.: Недра-XXI, 2013. С. 198–215.

3. Ковалевский В.Б., Масютина Е.У., Еремеев В.Е. Комплексное решение проблем антикоррозионной защиты трубопроводов и оборудования объектов ТЭК (ОАО ВНИИСТ) // Антикоррозионная защита – 2010: сб. докл. межотраслевой конф. М.: ИНТЕХЭКО, 2010. С. 8–11.

4. Чифилёв С.М. Применение покрытий внутренней поверхности НКТ для защиты от отложений АСПО // Студенческий научный форум: матер. XI Международ. студенческой науч. конф. М.: Евроазиатская научно-промышленная палата, 2019. URL: <https://files.scienceforum.ru/pdf/2019/5c8624da6991f.pdf> (дата обращения: 29.01.2021).

5. Инженерный отчет по результатам выполнения ОПИ внутреннего защитного покрытия НКТ в ОГ «Варьеганнефтегаз» // Алмаз. URL: http://www.almaz-hmao.ru/PDF/opi/otchet_vng_190615.pdf (дата обращения: 29.01.2021).

6. Никитин О. Насосно-компрессорная труба: рецепт долголетия // Деловой журнал «Neftegaz.RU». 21.05.2009. URL: <https://neftegaz.ru/science/adaptations/332325-nasosno-kompressornaya-truba-retsept-dolgoletiya/> (дата обращения: 30.01.2021).

7. Шуголь А.А. Опыт применения защитных решений Majorpack на коррозионном добывающем фонде и скважинах системы ППД // Инженерная практика. 2015. № 6–7. URL: <https://glavteh.ru/majorpack-korrozia-skvaizhiny-ppd/> (дата обращения: 01.02.2021).

8. Саидов У.А. Опыт-промысловые испытания НКТ с внутренним покрытием для защиты от АСПО // Инженерная практика. 2019. № 11–12. URL: <https://glavteh.ru/opi-nkt-pokrytie-aspo/> (дата обращения: 01.02.2021).

9. Егоров А.В., Николаев В.Ф., Султанова Р.Б. Упрощенный метод «холодного стержня» для оценки ингибирующего действия реагентов, применяемых при профилактике и удалении парафинотложений с металлических поверхностей при добыче и транспорте нефти // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 18. № 8. С. 295–299.

3. Несмотря на моделирование всей совокупности условий нефтедобычи в границах возможности лабораторного стенда, эксперимент не выявил разницу в результатах для образцов с внутренним полимерным покрытием и без него. Данное обстоятельство прямо противоречит результатам опытно-промысловых испытаний.

10. Маркин А.Н., Суховерхов С.В. Исследование кинетики выделения парафинов из нефти // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2011. № 5 (159). С. 66–71.

11. Тронов В.П. Механизм образования смоло-парафиновых отложений и борьба с ними. М.: Недра, 1970. 190 с.

REFERENCES

1. Markin A.N., Nizamov R.E., Sukhoverkhov S.V. *Neftepromyslovaya khimiya: prakticheskoe rukovodstvo* [Production Chemistry: Guidance Manual]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2011. 288 p. [in Russian].

2. Lozin E.V., Shuvalov A.V., Garifullin A.Sh. *Povyshenie effektivnosti razrabotki neftyanykh mestorozhdenii v zavershayushchei stadii* [Improving the Efficiency of Oil Field Development in the Final Stage]. *Sbornik izbrannykh statei, posvyashchennykh 50-letiyu deyateli'nosti TsKR po UVS «Sostoyanie i dal'neishee razvitiye osnovnykh printsipov razrabotki neftyanykh mestorozhdenii»* [Collection of Selected Articles Dedicated to the 50th Anniversary of the Central Committee for Hydrocarbon Management «State and Further Development of the Basic Principles of Oil Field Development»]. Moscow, Nedra-XXI Publ., 2013, pp. 198–215. [in Russian].

3. Kovalevskii V.B., Masyutina E.U., Eremeev V.E. *Kompleksnoe reshenie problem antikorroziionnoi zashchity truboprovodov i oborudovaniya ob'ektov TEK (OAO VNIIST)* [Comprehensive Solution to the Problems of Corrosion Protection of Pipelines and Equipment of Fuel and Energy Facilities (JSC VNIIST)]. *Sbornik dokladov mezhotraslevoi konferentsii «Antikorroziionnaya zashchita — 2010»* [Collection of Reports of the Interdisciplinary Conference «Anti-Corrosion Protection – 2010»]. Moscow, INTEKHEKO Publ., 2010, pp. 8–11. [in Russian].

4. Chifilev S.M. *Primenenie pokrytii vnutrennei poverkhnosti NKT dlya zashchity ot otlozhenii ASPO* [Using the Coverings of the Inner Surface of the Pipeline to Protect Against Deposits of Paraffin]. *Materialy XI Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii «Studencheskii nauchnyi forum»* [Materials of the XI International Student Scientific Conference «Student Scientific Forum»]. Moscow, Evroaziatskaya nauchno-promyshlennaya palata Publ., 2019. URL: <https://files.scienceforum.ru/pdf/2019/5c8624da6991f.pdf> (accessed 29.01.2021). [in Russian].

5. *Inzhenernyi otchet po rezul'tatam vypolneniya OPI vnutrennego zashchitnogo pokrytiya NKT v OG «Varyeganneftegaz»* [Engineering Report on the Results of Pilot Testing of the Internal Protective Coating of Tubing in OG «Varyeganneftegaz»]. *Almaz*. URL: http://www.almaz-hmao.ru/PDF/opi/otchet_vng_190615.pdf

hmap.ru/PDF/opi/otchet_vng_190615.pdf (accessed 29.01.2021). [in Russian].

6. Nikitin O. Nasosno-kompressornaya truba: retsept dolgoletiya [Tubing: a Recipe for Longevity]. *Delovoi zhurnal «Neftegaz.RU» — Business Magazine «Neftegaz.RU»*. 21.05.2009. Available at: <https://neftgaz.ru/science/adaptations/332325-nasosno-kompressornaya-truba-retsept-dolgoletiya/> (accessed 30.01.2021). [in Russian].

7. Shugol A.A. Opyt primeneniya zashchitnykh reshenii Majorpack na korrozionnom dobyvayushchem fonde i skvazhinakh sistemy PPD [Experience in the Application of Protective Solutions Majorpack on Corrosive Production Stock and Wells of the Pressure Maintenance System]. *Inzhenernaya praktika — Engineering Practice*, 2015, No. 6–7. Available at: <https://glavteh.ru/majorpack-korroziya-skvazhiny-ppd/> (accessed 01.02.2021). [in Russian].

8. Saidov U.A. Opytno-promyslovye ispytaniya NKT s vnutrennim pokrytiem dlya zashchity ot ASPO [Pilot Field Tests of Tubing with Inner Coating for Protection Against ARPD]. *Inzhenernaya praktika — Engineering Practice*, 2019, No. 11–12. Available at: <https://glavteh.ru/opi-nkt-pokrytie-aspo/> (accessed 01.02.2021). [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Юдин Павел Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», СамГТУ, директор по науке, ООО «НПЦ «Самара», г. Самара, Российская Федерация

Pavel E. Yudin, Candidate of Engineering Science, Assistant Professor of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, SamSTU, Director for Science, Scientific and Production Center «Samara» LLC, Samara, Russian Federation

Богатов Максим Валерьевич, аспирант кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», СамГТУ, инженер испытательной лаборатории, ООО «НПЦ «Самара», г. Самара, Российская Федерация

Maxim V. Bogatov, Post-graduate Student of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, SamSTU, Engineer of the Testing Laboratory, Scientific and Production Center Samara, Samara, Russian Federation
e-mail: bogatov@npcsamara.ru

9. Egorov A.V., Nikolaev V.F., Sultanova R.B. Uproshchennyi metod «kholodnogo sterzhnya» dlya otsenki ingibiruyushchego deistviya reagentov, primenyaemykh pri profilaktike i udaleni parafinotlozhenii s metallicheskiikh poverkhnostei pri dobyche i transporte nefti [Simplified «Cold Stick» Method for Assessing the Inhibitory Effect of Reagents Used in the Prevention and Removal of Wax Deposits from Metal Surfaces During Oil Production and Transportation]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta — Herald of Kazan Technological University*, 2012, Vol. 18, No. 8, pp. 295–299. [in Russian].

10. Markin A.N., Sukhoverkhov S.V. Issledovanie kinetiki vydeleniya parafinov iz nefti [Research of the Kinetics of Wax Crystallization from The Crude]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya RAN — Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2011, No. 5 (159), pp. 66–71. [in Russian].

11. Tronov V.P. *Mekhanizm obrazovaniya smolo-parafinovykh otlozhenii i bor'ba s nimi* [The Mechanism of Formation of Resin-Paraffin Deposits and the Fight against them]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 190 p. [in Russian].