

УДК 622.692.4

А.В. Козлов, К.А. Вяткин

A.V. Kozlov, K.A. Vyatkin

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

ОЦЕНКА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ АСПО НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

DEFINITION OF THE TRANSCALENCY OF WAX BASED ON LABORATORY STUDIES

Исследована возможность определения теплопроводности АСПО в лабораторных условиях. Знание данного параметра необходимо при моделировании линейных трубопроводов. Исследования проводились на установке «Холодный стержень» CF-4. Проведена апробация предлагаемой методики, подтверждающая ее корректность.

Ключевые слова: нефтепровод, слой парафина, многослойная структура, число Нуссельта, число Рейнольдса, режимы течения, коэффициент теплоотдачи, физическое моделирование.

The work investigated the possibility of determining the thermal conductivity of WAX in laboratory conditions. Knowledge of this parameter is necessary when conducting modeling of linear pipelines. Research was conducted on the installation of the "Cold Rod" CF-4. This technique was tested, confirming its correctness.

Keywords: oil pipeline, paraffin layer, multilayered structure, Nusselt number, Reynolds number, current modes, heat-transfer coefficient, physical model operation

Введение

Наиболее распространенным видом осложнения, возникающего при эксплуатации нефтяных месторождений, является образование на внутренних поверхностях глубинно-насосного оборудования (ГНО) и линейных трубопроводов асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) [1, 2]. Данное явление приводит к повышению давления в линейных трубопроводах, преждевременным отказам нефтедобывающих скважин, уменьшению ресурса работы ГНО и авариям на линейных трубопроводах [3, 4].

В настоящий момент множество исследований в нефтегазовой отрасли направлено на цифровизацию или цифровую трансформацию нефтегазового комплекса и оптимизацию процессов добычи и транспортировки нефти. Под цифровой трансформацией понимается постоянный процесс совершенствования и трансформации бизнес-модели, основанной на управлении цифровыми

активами. Цифровыми активами в данном случае являются физически обоснованные модели физических активов [5, 6].

Одним из таких цифровых активов является физическая модель линейного трубопровода. Одной из важнейших составляющих данной модели является прогнозирование распределения температуры по длине трубопровода. Для наиболее точного прогнозирования распределения температуры необходимо проводить оценку теплопроводности асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО). На рис. 1 представлена схема распределения температуры в элементе сечения линейного трубопровода.

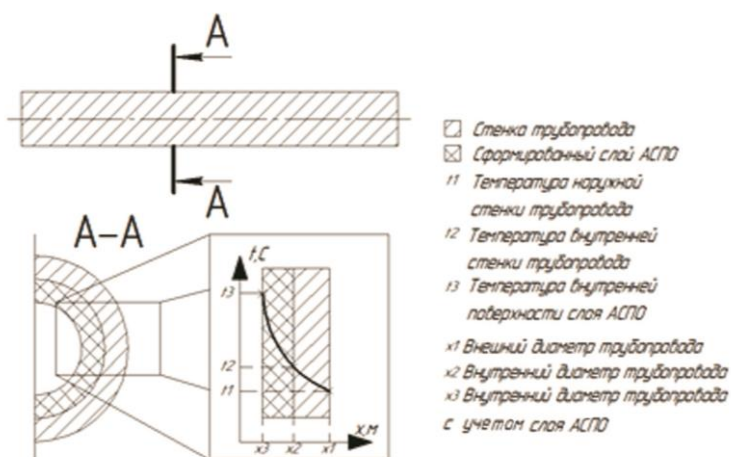


Рис. 1. Схема распределения температуры в сечении линейного трубопровода

В настоящее время известно множество методов определения теплопроводности различных материалов [7, 8, 9, 10, 11, 12]. Основными недостатками данных методов являются невозможность оценки теплопроводности гелеобразных АСПО, неприменимость в лабораторных условиях, дороговизна и сложный математический аппарат.

Наибольшая сложность заключается в определении формы и агрегатного состояния отложений АСПО. Дело в том, что АСПО являются гелеподобными, неоднородными по длине, толщине и составу. Вследствие этого при их отложении на поверхности единственными параметрами, которые можно оценить, не отделяя их от поверхности «холодных стержней», являются температура и толщина в определенной точке сечения.

Методика определения теплопроводности АСПО

Предлагаемая методика определения теплопроводности АСПО основывается на определении косвенных величин при проведении лабораторных исследований. Оценка теплопроводности по данной методике будет проводиться при помощи установки «Холодный стержень» CF-4, представленной на рис. 2.

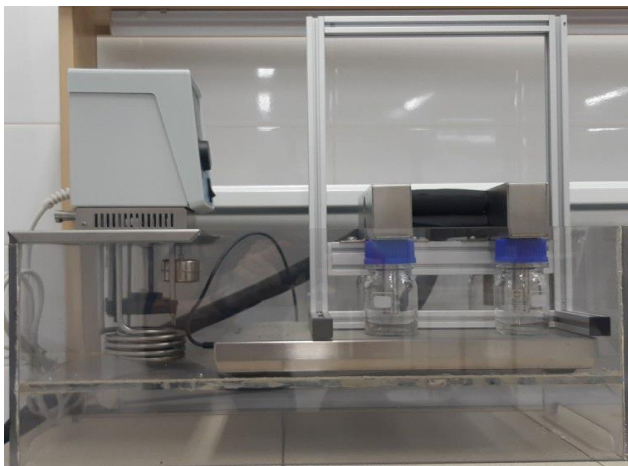


Рис. 2. Изображение установки «Холодный стержень» CF-4

Принцип работы данной установки состоит в моделировании «обратного нефтепровода». При помощи термостата-циркулятора холодная жидкость подается на нижнюю точку внутренней поверхности «холодного стержня» по изолированному каналу, затем поднимается вне данного канала и возвращается в термостат-циркулятор. К корпусу установки прикручиваются стеклянные пробирки с пробой нефти, разогретой до требуемой температуры. Корпус установки с пробирками опускается в водяную баню, нагретую при помощи жидкостного термостата до требуемой температуры. В водяной бане установлено магнитное перемешивающее устройство для имитации движения жидкости по трубопроводу. Таким образом поддерживается постоянная температура на внутренней поверхности «холодных стержней» и в пробе нефти.

До проведения исследования требуется измерить длину, внутренний и внешний диаметры «холодных стержней». Исследования проводятся по методике, указанной в работе [13]. На данной установке при создании градиента температуры между водяной баней и поверхностью «холодных стержней» будет происходить процесс кристаллизации АСПО на внешней поверхности «холодных стержней». По окончании исследования внутреннее циркуляционное охлаждение не отключается, а остается активным для достижения стационар-

ного теплообмена, после чего необходимо выбрать некоторое количество характерных точек на поверхности слоя АСПО и измерить температуру и толщину слоя АСПО в этих точках. Аналогичные замеры необходимо провести до начала проведения исследования при стационарном режиме на «холодных стержнях» в отсутствие отложений. Для определения теплопроводности АСПО воспользуемся формулой расчёта теплового потока через цилиндрическую стенку:

$$Q = \frac{\pi \cdot l \cdot \Delta T}{\frac{1}{a_1 \cdot d_1} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) + \frac{1}{a_2 \cdot d_{n+1}}}, \quad (1)$$

где l – длина «холодного стержня», м; ΔT – перепад температуры, °С; d_{n+1} – внешний диаметр теплоизолирующего слоя, м; d_1 – внутренний диаметры теплоизолирующего слоя, м; d_{i+1} и d_i – внешний и внутренний диаметры теплоизолирующего слоя, м; λ_i – коэффициент теплопроводности теплоизолирующего материала, Вт/(м·град); Q – тепловой поток, Вт; a_1 и a_2 – коэффициенты теплоотдачи от горячего флюида к стенке и от стенки к воздуху, Вт/(м²·К).

Введем следующие величины: линейную плотность теплового потока q_l (Вт/м) и линейное термическое сопротивление теплопередачи через стенку цилиндрической формы в отсутствие отложений АСПО (R_{l1}) (м·К)/Вт.

$$q_l = \frac{Q}{l}, \quad (2)$$

$$R_{l1} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \left(\frac{1}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{d_2}{d_3} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{n+1}}, \quad (3)$$

где d_3 – внешний диаметр стержня, м; d_2 – внутренний диаметр стержня, м; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала «холодного стержня», Вт/(м·град).

Величиной $\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{n+1}}$ в данном расчете предлагается пренебречь ввиду

того, что свободный конвективный теплообмен между поверхностью «холодного стержня» и окружающим воздухом был незначительно мал. Запишем выражение (1) для случая стационарного режима теплообмена без отложений АСПО на поверхности с учетом выражений (2) и (3):

$$q_{l1} = \frac{\pi \Delta T}{R_{l1}}. \quad (4)$$

В выражении (4) ΔT определяется по выражению

$$\Delta T = T_{\text{ст}} - T_{\text{жид}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ст}}$ – температура на поверхности «холодного стержня» при стационарном режиме в отсутствие АСПО, °С; $T_{\text{жид}}$ – температура охлаждающей жидкости, °С.

Для определения коэффициента теплоотдачи от горячего флюида к стенке (α_1) воспользуемся формулой критерия Нуссельта

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}, \quad (6)$$

где Nu – число Нуссельта; d – эквивалентный диаметр, м.

Причем для трубы круглого сечения эквивалентный диаметр равен внутреннему диаметру трубы. Для нахождения числа Нуссельта требуется определить критериальное уравнение, описывающее его. Для этого требуется определить значение величины Re (число Рейнольдса) и комплекса $GrPr$ (произведение чисел Прандтля и Грасгофа), которые можно найти, используя следующие выражения:

$$Gr = \frac{g\beta d^3}{\mu^2} \Delta T, \quad (7)$$

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; β – температурный коэффициент объемного расширения, град⁻¹; ν – кинематическая вязкость жидкости при средней температуре, м²/с; ΔT – средняя разность температур жидкости и стенки, °С; v – скорость течения жидкости, м/с; μ – кинематическая вязкость жидкости при средней температуре, м²/с;

Число Прандтля является константой для воды и зависит лишь от ее температуры. По полученным значениям выражений (7) и (8) определяется критериальное уравнение для нахождения числа Нуссельта. При определении теплопроводности АСПО на установке «Холодный стержень» CF-4 рекомендуется использовать следующее критериальное выражение:

$$Nu = 0,76(Gr \cdot Pr_{\text{ж}})^{0,25} \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25}, \quad (9)$$

где $Pr_{\text{с}}$ число Прандтля при температуре стенки; $Pr_{\text{ж}}$ – число Прандтля при средней температуре охлаждающей жидкости.

По выражению (4) с учетом выражений (5) – (9) можно вычислить линейную плотность теплового потока в отсутствие отложений АСПО. Однако ввиду того что режим теплообмена стационарный, данная величина будет

неизменна и после наложения АСПО на поверхность «холодного стержня». Для этого случая запишем выражения (3) и (4), учитывая адгезированный слой АСПО, следующим образом:

$$q_{l1} = q_{l2} \frac{\pi \Delta T}{R_{l2}}, \quad (10)$$

$$R_{l2} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \left(\frac{1}{2\lambda_{\text{ст}}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_3} \right) + \left(\frac{1}{2\lambda_{\text{АСПО}}} \ln \frac{d_3}{d_4} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{n+1}}, \quad (11)$$

где $\lambda_{\text{АСПО}}$ теплопроводность АСПО, Вт/(м·град); d_4 внешний диаметр стенки «холодного стержня» с учетом отложений АСПО, м.

Объединив выражения (10) и (11), получим расчётную формулу для нахождения теплопроводности АСПО:

$$\lambda_{\text{АСПО}} = \frac{\ln \frac{d_3}{d_4}}{\frac{\pi \Delta T}{q_{l2}} - \frac{1}{\alpha_1 d_1} - \left(\frac{1}{2\lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{d_2}{d_3} \right)}. \quad (12)$$

Заключение

Применение предложенной методики позволяет без серьезных временных и денежных затрат оценить теплопроводность слоя АСПО, однако следует учитывать, что теплопроводность АСПО будет меняться при малейшем изменении его физико-химических свойств (состава, плотности, наличия внутри пузырьков газа и т.д.)

Подводя итог вышесказанному, отметим, что преимуществами данного метода определения теплопроводности является простота математического аппарата, применимость в лабораторных условиях, отсутствие потребности в дорогостоящем оборудовании. Недостатками же данного метода можно считать неточность определения температуры поверхности АСПО, диаметра отложений и допущение на отсутствие свободного теплообмена между поверхностью «холодного стержня» и воздухом. Влияние данных факторов можно минимизировать, применяя оборудование с небольшим допуском на ошибку.

Список литературы

1. Study on Inhibition of High-Molecular-Weight Paraffins for South Eagle Ford Condensate / K. Gawas [et al.] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2015.

2. Wax deposition study in a cold-finger system with model oil / K. Fan [et al.] // SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2015.

3. Устькачкинцев Е.Н., Мелехин С.В. Определение эффективности методов предупреждения асфальтеносмолопарафиновых отложений // Вестн. ПНИПУ. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 18.

4. Иванова Л.В., Буров Е.А., Кошелев В.Н. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессах добычи, транспорта и хранения // Нефтегазовое дело. – 2011. – №. 1. – С. 268–284.

5. Сулоева С.Б., Мартынатов В.С. Особенности цифровой трансформации предприятий нефтегазового комплекса // Организатор производства. – 2019. – С. 27.

6. Буренина И.В., Гайфуллина М.М., Сайфуллина С.Ф. Социально-экономические трансформации, связанные с реализацией проектов разработки и внедрения технологий индустрии 4. 0 // Вестн. евразийской науки. – 2018. – Т. 10, №. 5.

7. Гусейнов Г.Г. Устройство для определения коэффициента теплопроводности методом пластины // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2010. – № 2.

8. Желтков В.И., Кухарь В.Д., Киреева А.Е. Определение стационарной теплопроводности в прямом стержне прямоугольного сечения // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2010. – №2–2.

9. Замула Г.Н., Иванов С.Н. Определение эффективной теплопроводности и излучательной способности многослойных и подкрепленных конструкций // Учен. зап. ЦАГИ. – 1970. – Т. 1, № 1.

10. Новый метод определения температурной зависимости коэффициента теплопроводности диэлектриков в импульсном эксперименте / Баранов В.Г. [и др.] // Перспективные материалы. – 2009. – №. 4. – С. 91–98.

11. Трубаев П.А. Экспериментальное определение теплопроводности клинкерных гранул методом решения обратной задачи // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2009. – №. 1. – С. 44–48.

12. Кузьмин А.П., Ляшков В.И., Кузьмин А.А. Определение теплопроводности порошка диоксида марганца // Вестн. Тамбов. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 1.

13. Вяткин К.А., Козлов А.В. Изучение, влияющих на интенсивность парафинообразования факторов в лабораторных условиях // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2019. – Т. 1. – С. 96–98.

Получено 21.02.2020

Козлов Антон Вадимович – студент, горно-нефтяной факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: anton.kozlov@girngm.ru.

Вяткин Кирилл Андреевич – аспирант, горно-нефтяной факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: kirill.vyatkin@girngm.ru.

Научный руководитель **Илюшин Павел Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: ilushin-pavel@yandex.ru.