

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ НАГРЕВА СИСТЕМЫ ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ–МЕТАЛЛ ТРУБОПРОВОДА ПРИ СВЧ-ОБРАБОТКЕ

Е.М. Абуталипова¹

А.А. Александров²

Ю.В. Лисин³

И.В. Павлова¹

Н.С. Шулаев¹

elenaabutalipova.ea@gmail.com

rector@bmstu.ru

niitnn@niitnn.transneft.ru

79373198395@yandex.ru

nshulayev@rambler.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

³ ООО «НИИ Транснефть», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследован процесс нагрева системы полимерное покрытие–металл трубопровода в условиях воздействия сверхвысокочастотного электромагнитного поля. Разработана математическая модель теплофизических процессов при сверхвысокочастотной обработке неоднородных по составу и свойствам многослойных систем. Разработаны и обоснованы режимные параметры технологии термической обработки внутренних антикоррозионных полимерных покрытий трубопроводов путем сверхвысокочастотного нагрева, позволяющие обеспечить улучшение физико-механических свойств покрытия. Разработано мобильное сверхвысокочастотное устройство для обработки внутренней поверхности изолированного трубопровода. Выполнены экспериментальные исследования влияния режимов сверхвысокочастотной обработки на особенности протекания теплофизических процессов в системе полимерное покрытие–металл трубопровода, а также на формирование высоких эксплуатационных свойств покрытия. Исследованы характеристики и свойства покрытий в широком диапазоне мощности сверхвысокочастотного воздействия, определены температурные зависимости нагрева системы от времени и мощности сверхвысокочастотного воздействия. Экспериментально установлено повышение температуры в паре покрытие–праймер на 3...5 °С, что способствует более прочному сцеплению ее с металлом трубы

Ключевые слова

Трубопровод, антикоррозионное полимерное покрытие, СВЧ-обработка, электромагнитное поле, энергообмен

Поступила в редакцию 29.12.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Безопасность эксплуатации трубопроводного транспорта энергоносителей, занимающего важное место в топливно-энергетическом комплексе Российской Федерации, в значительной степени зависит от качества противокоррозионной

защиты оборудования [1]. В частности, одним из методов предотвращения коррозии нефтегазопроводов, находящихся в контакте с агрессивными средами, является защита как наружной, так и внутренней их поверхности изоляционными покрытиями.

В большинстве случаев основная функция изоляционного покрытия заключается в создании физического барьера, препятствующего прониканию коррозионной среды к поверхности металла трубы. В настоящее время нефтедобывающие скважины характеризуются высокой степенью обводненности, вследствие чего нефтепродукты, поступающие в систему транспорта, содержат углекислый газ и сероводород, растворенные в воде, а также коррозионно-активные микроорганизмы. Транспортировка агрессивных сред в трубопроводах приводит к ухудшению барьерных свойств изоляционных покрытий и к разрушению металла труб под ними.

Дальнейшее совершенствование и развитие технологий противокоррозионной защиты нефтегазопроводов с применением антикоррозионных полимерных покрытий невозможно без поиска новых энергоэффективных способов улучшения их свойств, а также без проведения дополнительных исследований строения, физико-механических свойств изоляционных материалов и особенностей системы металл трубы–антикоррозионное покрытие. В последнее время для модификации свойств полимерных материалов довольно часто используют СВЧ-излучение, которое имеет ряд преимуществ: интенсифицирует энергообмен в обрабатываемом материале и обеспечивает равномерность его обработки; эффективно и устойчиво изменяет свойства материала; не вызывает его расплавление или деструкцию; не требует использования дополнительных ингредиентов для изменения структуры материала; вследствие отсутствия инерционности обеспечивает стабильность энергетического потока при варьировании его мощности [2–5].

Режимы СВЧ-обработки изоляционных полимерных материалов на основе поливинилхлорида как в процессе их производства, так и при нанесении антикоррозионного покрытия на наружную поверхность трубопроводов были установлены в работах [6, 7]. Для обработки изоляционных покрытий электромагнитным излучением на наружной поверхности трубы была разработана мобильная СВЧ-установка, использование которой в эксперименте показало значительное увеличение (на 60 %) адгезии полимерных покрытий к поверхности металла [8–10]. В связи с этим значительный интерес представляет разработка способа обработки внутренних антикоррозионных полимерных покрытий нефтегазопроводов излучением СВЧ-диапазона, а также устройств для его осуществления.

При разработке способов модификации свойств полимерных покрытий трубопроводов с использованием электромагнитного излучения СВЧ-диапазона возникает необходимость математического моделирования теплофизических процессов, протекающих в системе полимерное изоляционное покрытие–праймер–металл.

Математическая модель распределения значений температуры в системе полимерное покрытие–праймер–металл. В результате воздействия электромагнитного поля СВЧ-диапазона на трубопровод с нанесенным внутренним антикоррозионным покрытием в материале возникают объемные источники теплоты, механизм возникновения которых был описан в работах [11, 12], температура его поверхности возрастает, а часть энергии идет на перегруппировку макромолекул полимерного покрытия.

Возникающая при поглощении электромагнитной энергии СВЧ-диапазона объемная мощность q_v определяется следующим образом:

$$q_v = \begin{cases} \frac{P_{ir}}{\delta F (1 - \varepsilon)}, & 0 \leq x \leq \delta; \\ 0, & x > \delta, \end{cases}$$

где P_{ir} — поглощаемая материалом мощность излучения, приблизительно равная мощности излучения магнетрона при отсутствии отражений, которые может испытывать электромагнитная волна при прохождении сред с различной диэлектрической проницаемостью, и потерь в направляющей системе; δ — глубина проникания электромагнитного излучения в среду (вещество), зависящая в равной степени как от параметров СВЧ-излучения, так и от структуры и электрофизических характеристик материала; F — площадь поперечного сечения рупора СВЧ-установки; ε — пористость слоя материала.

Для выбора оптимального режима СВЧ-воздействия необходимо правильно оценить характерные периоды протекающих в системе процессов, а также контролировать градиент температуры по слоям рассматриваемой системы в целях предотвращения потери полимерной пленкой необходимых эксплуатационных свойств, приводящей к ее разрушению.

Если время релаксации сдвиговых напряжений в полимере, необходимое для осуществления перегруппировки, меньше периода изменения направления магнитного поля, то молекулы полимера изменяют свой дипольный момент, в результате чего происходит перестройка структуры полимера.

Упорядочение структуры полимерной основы сопровождается уменьшением областей свободного объема в ней и увеличением теплоемкости полимерного покрытия. Расчет значений теплоемкости и теплопроводности позволяет установить распределение температуры по слоям системы при заданном режиме СВЧ-обработки антикоррозионного покрытия. Схема рассматриваемой системы приведена на рисунке.

Математическую модель кинетики нагрева системы полимерный материал–праймер–металл при проведении СВЧ-обработки можно описать одномерным уравнением теплопроводности

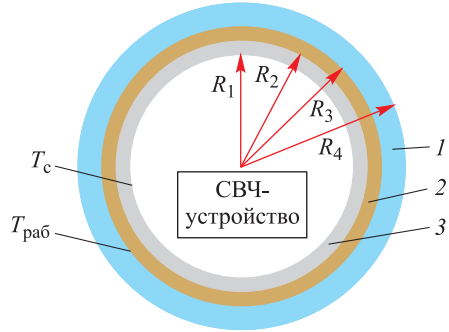
$$c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \text{grad} T) + I_q, \quad (1)$$

где c — удельная теплоемкость системы; ρ — усредненная плотность системы; T — температура системы; λ — коэффициент теплопроводности системы;

$I_q = P/V$ — поглощенная полимерной пленкой энергия СВЧ-излучения; P — мощность СВЧ-излучения; $V = \pi L(R_4^2 - R_1^2)$ — объем обрабатываемой системы; L — длина обрабатываемого СВЧ-излучением участка трубопровода; R_1 — наружный радиус покрытия; R_4 — внешний радиус трубы.

Схема системы внутреннее полимерное покрытие–праймер–металл:

R_1 — наружный радиус покрытия; R_2 — внутренний радиус покрытия; R_3 — внутренний радиус трубы; R_4 — внешний радиус трубы; T_c — температура обрабатываемой системы; $T_{раб}$ — рабочая температура; 1 — труба; 2 — праймер; 3 — полимерное покрытие



Усредненная плотность системы характеризуется соответствующими величинами ее элементов

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{V}(\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2 + \rho_3 v_3).$$

Здесь m — общая масса системы (покрытие, праймер, металл трубы); $\rho_{1,2,3}$ — плотности покрытия, праймера, металла трубы; $v_i = \pi L(R_{i+1}^2 - R_i^2)$ — объем i -го слоя (см. рисунок); $i = 1, 2, 3$.

При обработке СВЧ-излучением достигается минимальный градиент температуры по всему объему системы $\text{div}(\lambda \text{grad}T) \ll I_q$, поэтому уравнение (1) будет иметь следующий вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = I_q - \alpha S T, \tag{2}$$

где α — удельный коэффициент теплообмена с окружающей средой; $S = 2\pi R_4 L$ — площадь поверхности системы (контакта с окружающей средой).

Решение уравнения (2) можно представить в виде

$$T(t) = \frac{I_q}{\alpha S} \left(1 - e^{-\frac{\alpha S}{c\rho} t} \right);$$

$$T(t) = T_{о.с} - T_c.$$

Здесь $T_{о.с}$ — температура окружающей среды; T_c — температура обрабатываемой системы; t — время обработки системы СВЧ-излучением.

На нагрев системы требуется время, равное $t_n \approx 5 \frac{c\rho}{\alpha S}$ [13], после чего устанавливается рабочая температура, определяемая мощностью СВЧ-излучения:

$$T_{\text{раб}} = T_c + \frac{I_q}{\alpha S} = T_c + \frac{P}{\alpha SV}.$$

При установлении режима обработки трубопровода распределение температуры по слоям системы полимерное покрытие–праймер–металл определяется из уравнения

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial}{\partial r} \right) T(r) = 0, \tag{3}$$

где r — радиус трубы в цилиндрической системе координат.

Решая уравнение (3), получаем систему уравнений для определения температуры каждого слоя системы:

$$\begin{aligned} T(R_1 < r \leq R_2) &= \frac{c_1}{\lambda_1} \ln r + c_2; \\ T(R_2 < r \leq R_3) &= \frac{c_3}{\lambda_2} \ln r + c_4; \\ T(R_3 < r \leq R_4) &= \frac{c_5}{\lambda_3} \ln r + c_6. \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь R_1 — наружный радиус покрытия; R_2 — внутренний радиус покрытия; R_3 — внутренний радиус трубы; R_4 — внешний радиус трубы; $\lambda_{1,2,3}$ — коэффициенты теплопроводности полимерного покрытия, праймера и металла трубы; c — константы интегрирования.

Запишем граничные условия для системы (4)

$$T(r = R_1) = T_c; \quad T(r = R_3) = T_{\text{раб}},$$

тогда с учетом равенства температуры на границах слоев и равенства тепловых потоков в системе имеем

$$\begin{aligned} c_2 + \frac{c_1}{\lambda_1} \ln R_1 &= T_c; \\ c_2 + \frac{c_1}{\lambda_1} \ln R_2 &= c_4 + \frac{c_3}{\lambda_2} \ln R_2; \\ c_4 + \frac{c_3}{\lambda_2} \ln R_3 &= c_6 + \frac{c_5}{\lambda_3} \ln R_3 = T_{\text{раб}}. \end{aligned} \tag{5}$$

Найдем константы интегрирования, решая систему уравнений (5) при справедливости равенства $c_1 = c_3 = c_5$:

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{T_{\text{раб}} - T_c}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{R_3}{R_2}}; & c_2 &= T_c - \frac{\ln R_1}{\lambda_1} c_1; \\ c_4 &= T_{\text{раб}} - \frac{\ln R_3}{\lambda_2} c_1; & c_6 &= T_{\text{раб}} - \frac{\ln R_3}{\lambda_3} c_1. \end{aligned}$$

Следовательно, характер изменения температуры в полимерном покрытии, в слое праймера и стенке трубы описывается следующими уравнениями:

$$T(R_1 < r \leq R_2) = T_c + \frac{c_1}{\lambda_1} \ln \frac{r}{R_1};$$

$$T(R_2 < r \leq R_3) = T_{\text{паб}} + \frac{c_1}{\lambda_2} \ln \frac{r}{R_3};$$

$$T(R_3 < r \leq R_4) = T_{\text{паб}} + \frac{c_1}{\lambda_3} \ln \frac{r}{R_3}.$$

Разработанная математическая модель кинетики нагрева рассматриваемой системы при СВЧ-обработке изоляционного покрытия после его нанесения на трубопровод позволяет не только послойно контролировать градиент температуры, но и рассчитывать значения рабочих параметров системы, обеспечивать сохранение и улучшение физико-механических свойств покрытия. Кроме того, в модели учтено воздействие на структуру полимерного покрытия отраженного от поверхности металла трубы поступающего энергетического потока.

Экспериментальные исследования влияния времени воздействия СВЧ-излучения на температуру нагрева металла. В результате экспериментальных исследований влияния времени воздействия на температуру нагрева металла при воздействии электромагнитного поля СВЧ-диапазона мощностью излучения 180, 240 и 360 Вт получены значения, приведенные в таблице.

Значения температуры нагрева, °С, поверхности трубопровода в зависимости от времени и мощности СВЧ-воздействия

Мощность СВЧ-воздействия, Вт	Время воздействия, с							
	0	60	120	180	240	300	360	420
180	20	21,9	23,7	24,9	26,12	26,9	27,65	28,05
240	20	22,62	24,1	25,75	26,6	27,42	28,28	28,78
360	20	23	24,9	26,25	27,3	28,5	29,1	29,8

Для практического применения разработанной мобильной СВЧ-установки, предназначенной для обработки внутренних изоляционных покрытий трубопроводов, необходимо задать технологические режимы термической обработки, которые могут значительно различаться для однородных и неоднородных (многослойных) систем. Режимы термической обработки определяются по результатам экспериментальных исследований.

Выводы. Разработана математическая модель кинетики нагрева системы полимерное покрытие–праймер–металл трубы, использование которой позволит рассчитать необходимые параметры системы и обеспечить формирование высоких технологических свойств покрытия.

Предложенная математическая модель процесса нагрева многослойной и неоднородной системы позволяет в режиме реального времени контролировать температуру различных ее областей (слоев) в целях оценки вероятности их локального перегрева, приводящего к деструкции и охрупчиванию изоляционного покрытия. Преимуществами такой модели являются параметрический учет

природы материалы каждого слоя, а также возможность моделирования многослойных покрытий (систем).

Экспериментально установлено, что температура на границе металла с парой полимерное покрытие–праймер на 3...5 °С выше, чем температура обрабатываемой поверхности покрытия, что является достаточным для существенного повышения ее адгезии к металлу трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лисин Ю.В., Александров А.А. Мониторинг магистральных нефтепроводов в сложных геологических условиях // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2013. № 2 (10). С. 22–27.
2. Архангельский Ю.С., Девяткин И.И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. 140 с.
3. Рахманкулов Д.Л., Бикбулатов И.Х., Шулаев Н.С., Шавишуква С.Ю. Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов. М.: Химия, 2003. 220 с.
4. Калганова С.Г., Архангельский С.Г., Яфаров Р.К. Измерения в СВЧ электротехнологических установках. Саратов: СГТУ, 2008. 262 с.
5. Абуталипова Е.М., Кузеев И.Р., Шулаев Н.С. Улучшение эксплуатационных свойств изоляционных покрытий с использованием сверхвысокочастотного излучения // Нефтегазовое дело. Электрон. журн. 2013. № 4. С. 316–322. URL: http://ogbus.ru/authors/AbutalipovaEM/AbutalipovaEM_1.pdf
6. Ибрагимов И.Г., Абакачева Е.М., Сулейманов Д.Ф., Фахразов А.Р. Мобильная сверхвысокочастотная установка для модификации полимерных материалов // Нефтегазовое дело. Электрон. журн. 2012. № 10–2. С. 73–74. URL: http://ngdelo.ru/files/old_ngdelo/2012/2/ngdelo-2-2012-p73-74.pdf
7. Установка для нанесения изоляционного ленточного покрытия на трубопровод / Н.С. Шулаев, Д.Ф. Сулейманов, Е.М. Абуталипова, С.П. Иванов, И.Г. Ибрагимов, А.Ю. Горина, Р.М. Маликов. Патент № 145191 РФ. Опубл. 10.09.2014. 2 с.
8. Абакачева Е.М., Шулаев Н.С., Фахразов А.Р., Киреев К.А. Применение сверхвысокочастотной электромагнитной установки для модификации полимерных пленок и исследование их свойств // Башкирский химический журнал. 2010. Т. 17. № 5. С. 79–81.
9. Исследование влияния энергетического потока СВЧ-излучения на строение и свойства полимерных изоляционных материалов / Е.М. Абуталипова, Д.Е. Бугай, А.Н. Авренюк, О.Б. Стрельцов, И.Р. Сунгатуллин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 3. С. 40–43.
10. Сверхвысокочастотная электромагнитная установка для модификации полимерных пленок / Е.М. Абакачева, К.А. Киреев, Р.М. Маликов, Д.Ф. Сулейманов, Н.С. Шулаев. Патент № 118818 РФ. Опубл. 27.07.2012. 2 с.
11. Калганова С.В. Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле: Дис. ... д-ра. техн. наук. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 356 с.
12. Дмитриев Ю.К., Даминов Р.Р., Абакачева Е.М., Исламутдинова А.А. Исследование процесса нетеплового модифицирующего СВЧ-воздействия на полимерные материалы // Башкирский химический журнал. 2012. Т. 19. № 1. С. 203–206.

13. *Investigation of the effect of microwave-radiation energy flux on the structure and properties of polymeric insulating materials* / E.M. Abutalipova, D.E. Bugai, A.N. Avrenyuk, O.B. Strel'tsov, I.R. Sungatullin // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 52. Iss. 3. P. 212–216. DOI: 10.1007/s10556-016-0177-6 URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10556-016-0177-6>

Абуталипова Елена Мидхатовна — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета (Российская Федерация, Республика Башкортостан, 450062, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1).

Александров Анатолий Александрович — д-р техн. наук, профессор, ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Лисин Юрий Викторович — д-р техн. наук, генеральный директор ООО «НИИ Транснефть» (Российская Федерация, 117186, Москва, Севастопольский пр-т, д. 47а).

Павлова Ирина Вениаминовна — аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета (Российская Федерация, Республика Башкортостан, 450062, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1).

Шулаев Николай Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Информатика, математика и физика» Уфимского государственного нефтяного технического университета, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке (Российская Федерация, Республика Башкортостан, 453118, Стерлитамак, пр-т Октября, д. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Абуталипова Е.М., Александров А.А., Лисин Ю.В., Павлова И.В., Шулаев Н.С. Математическое моделирование кинетики нагрева системы полимерный материал–металл трубопровода при СВЧ-обработке // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2017. № 2. С. 118–128. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-2-118-128

MATHEMATICAL MODELING OF HEATING KINETICS IN POLYMERIC COATING PIPELINE METAL SYSTEM AT MICROWAVE PROCESSING

E.M. Abutalipova¹

elenaabutalipova.ea@gmail.com

A.A. Aleksandrov²

rector@bmstu.ru

Yu. V. Lisin³

niitnn@niitnn.transneft.ru

I.V. Pavlova¹

79373198395@yandex.ru

N.S. Shulaev¹

nshulayev@rambler.ru

¹ **Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation**

² **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

³ **Transneft Research Institute for Oil and Oil Products Transportation (Transneft R&D, LLC), Moscow, Russian Federation**

Abstract

The study investigates the heating process of the polymeric coating–pipeline metal system under the influence of microwave electromagnetic field. We developed a mathematical model of thermal processes at microwave processing of multilayer systems with non-uniform structure and properties. Moreover, we developed and substantiated the operating parameters of heat treatment technology for pipeline anticorrosive polymeric coating by microwave heating allowing for improvement of physical and mechanical properties of the coating. Furthermore, we developed a mobile microwave device for processing the coated pipeline internal surface. The study experimentally tests the effect the microwave processing modes have on features of thermal processes progress in the polymeric coating–pipeline metal system, as well as its effect on development of coating high serviceability. Finally, we examined the characteristics and properties of coatings in the wide range of microwave power influence, and determined temperature dependences of system heating on time and microwave power influence. By experiment we established the 3...5 degrees temperature rise in the pair coating–primer that promotes stronger adherence with pipeline metal

Keywords

Pipeline, anticorrosive polymeric coating, microwave processing, electromagnetic field, energy exchange

REFERENCES

- [1] Lisin Yu.V., Aleksandrov A.A. Monitoring of main pipeline facilities. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov* [Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation], 2013, no. 2 (10), pp. 22–27 (in Russ.).
- [2] Arkhangel'skiy Yu.S., Devyatkin I.I. Sverkhvysokochastotnye nagrevatel'nye ustanovki dlya intensivatsii tekhnologicheskikh protsessov [Super high frequency heating units for technical processes intensification]. Saratov, SSU Publ., 1983. 140 p.
- [3] Rakhmankulov D.L., Bikbulatov I.Kh., Shulaev N.S., Shavshukova S.Yu. Mikrovolnovoe izluchenie i intensivatsiya khimicheskikh protsessov [Microwave radiation and chemical processes intensification]. Moscow, Khimiya Publ., 2003. 220 p.
- [4] Kalganova S.G., Arkhangel'skiy S.G., Yafarov R.K. Izmereniya v SVCh elektrotekhnologicheskikh ustanovkakh [Measurements in SHF electrotechnology equipment]. Saratov, SSTU Publ., 2008. 262 p.
- [5] Abutalipova E.M., Kuzeev I.R., Shulaev N.S. Improve the performance of insulation coatings using microwave radiation. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2013, no. 4, pp. 316–322 (in Russ.). Available at: http://ogbus.ru/authors/AbutalipovaEM/AbutalipovaEM_1.pdf
- [6] Ibragimov I.G., Abakacheva E.M., Suleymanov D.F., Fakhrazov A.R. Mobile superhigh-frequency installation for updating of polymeric materials. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2012, no. 10–2, pp. 73–74 (in Russ.). Available at: http://ngdelo.ru/files/old_ngdelo/2012/2/ngdelo-2-2012-p73-74.pdf

[7] Shulaev N.S., Suleymanov D.F., Abutalipova E.M., Ivanov S.P., Ibragimov I.G., Gorina A.Yu., Malikov R.M. Ustanovka dlya nanoseniya izolyatsionnogo lentochnogo pokrytiya na truboprovod [Equipment for tape isolation extrusion on pipe-line]. Patent no. 145191 RF. Publ. 10.09.2014. 2 p. (in Russ.).

[8] Abakacheva E.M., Shulaev N.S., Fakhrazov A.R., Kireev K.A. Application of microwave installation for modification of polymeric films and research of their properties. *Bashkirskiy khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2010, vol. 17, no. 5, pp. 79–81 (in Russ.).

[9] Abutalipova E.M., Bugay D.E., Avrenyuk A.N., Strel'tsov O.B., Sungatullin I.R. Investigation of the effect of microwave-radiation energy flux on the structure and properties of polymeric insulating materials. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 212–216. DOI: 10.1007/s10556-016-0177-6 Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10556-016-0177-6>

[10] Abakacheva E.M., Kireev K.A., Malikov R.M., Suleymanov D.F., Shulaev N.S. Sverkhvysokochastotnaya elektromagnitnaya ustanovka dlya modifikatsii polimernykh plenok [SHF electro-magnetic setup for polymer film modification]. Patent no. 118818 RF. Publ. 27.07.2012. 2 p. (in Russ.).

[11] Kalganova S.V. Elektrotekhnologiya neteplovoy modifikatsii polimernykh materialov v SVCh elektromagnitnom pole: Dis. dok. tekhn. nauk [Nonthermal electrotechnology for polymer materials modification in SHF EM field: Dr. tech. sc. diss.]. Saratov, SSTU Publ., 2009. 356 p. (in Russ.).

[12] Dmitriev Yu.K., Daminev R.R., Abakacheva E.M., Islamutdinova A.A. Research of non-thermal modifying SHF-impact on polymeric materials. *Bashkirskiy khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2012, vol. 19, no. 1, pp. 203–206 (in Russ.).

[13] Abutalipova E.M., Bugai D.E., Avrenyuk A.N., Strel'tsov O.B., Sungatullin I.R. Investigation of the effect of microwave-radiation energy flux on the structure and properties of polymeric insulating materials. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016, vol. 52, no. 3, pp. 212–216. DOI: 10.1007/s10556-016-0177-6 Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10556-016-0177-6>

Abutalipova E.M. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Professor of Processing Machinery and Equipment Department, Ufa State Petroleum Technological University (Kosmonavtov ul. 1, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450062 Russian Federation).

Aleksandrov A.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Rector of Bauman Moscow State Technical University, Head of Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Lisin Yu.V. — Dr. Sc. (Eng.), General Director of Transneft Research Institute for Oil and Oil Products Transportation (Transneft R&D, LLC) (Sevastopolskiy prospekt 47a, Moscow, 117186 Russian Federation).

Pavlova I.V. — post-graduate student of Processing Machinery and Equipment Department, Ufa State Petroleum Technological University (Kosmonavtov ul. 1, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450062 Russian Federation).

Shulaev N.S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Informatics, Mathematics and Physics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Sterlitamak branch of Ufa State Petroleum Technological University (Oktyabrya prospekt 2, Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, 453118 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Abutalipova E.M., Aleksandrov A.A., Lisin Yu.V., Pavlova I.V., Shulaev N.S. Mathematical Modeling of Heating Kinetics in Polymeric Coating Pipeline Metal System at Microwave Processing. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2017, no. 2, pp. 118–128.

DOI: 10.18698/1812-3368-2017-2-118-128

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru www.baumanpress.ru

Подписано в печать 30.03.2017

Формат 70 × 108/16

Усл.-печ. л. 11,2

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии».

109316, Москва, Волгоградский пр-т, д. 42, корп. 5.

Тираж 100 экз.