

УДК66-963:67.02

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИОННЫХ  
ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ**

**IMPROVE THE PERFORMANCE OF INSULATION COATINGS USING  
MICROWAVE RADIATION**

Абуталипова Е.М., Кузеев И.Р., Шулаев Н.С.  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,  
филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

E.M. Abutalipova, I.R. Kuzeev, N.S. Shulaev  
FSBEI NPE “Ufa state petroleum technological university”,  
branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: elena-abakacheva@rambler.ru

**Аннотация.** В данной статье рассматривается подход к улучшению технологических и эксплуатационных свойств полимерных изоляционных покрытий трубопроводов путем их обработки излучением электромагнитного поля СВЧ-диапазона. В последние годы довольно широкое применение стало находить электромагнитное излучение сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Так как оно обладает рядом преимуществ: интенсифицирует энергообмен в веществе путем преобразования излучаемой энергии в кинетическую энергию колебаний молекул; обеспечивает равномерность обработки вещества в облучаемом объеме и высокую стабильность энергетического потока вследствие отсутствия инерционности при варьировании его мощности.

Предложена мобильная СВЧ-установка для обработки полимерных покрытий, управление которой осуществляется в автоматизированном режиме, контролирующем температуру покрытия на основе поддержания необходимых скорости и продолжительности обработки. Разработана математическая модель кинетики нагрева системы «полимерная пленка с клеевой подложкой - праймер - металл», используя которую можно рассчитать необходимые параметры данной системы и, тем самым, обеспечить формирование высоких технологических свойств покрытия.

**Abstract.** This paper discusses an approach to improve the technological and operational properties of polymeric insulating coatings of pipelines by their treatment of the electromagnetic field radiation microwave. In recent years it has become find wide application of microwave electromagnetic radiation of frequency (UHF) range, as it

offers several advantages: intensifies the energy exchange in the matter by converting radiation energy into kinetic energy molecules provides a uniform treatment of substances in the irradiated volume and the high stability of the energy flow due to the lack of variation in the inertia of its capacity.

A mobile microwave unit for the treatment of polymer coatings, which is controlled in automatic mode, controlling the temperature of the coating on the basis of maintaining the required speed and duration of treatment. A mathematical model of the kinetics of the heating system "polymer film with an adhesive backing - the primer - metal", which can be calculated using the required parameters of the system and thus ensure the formation of high technological properties of the coating.

**Ключевые слова:** СВЧ-излучение, полимерное изоляционное покрытие, трубопровод, конструкция, методика расчета, полимер, электромагнитное поле.

**Keywords:** microwave radiation, the polymer insulating coating, pipe, construction, method of calculation of the polymer, the electromagnetic field.

Одной из важнейших проблем энергетического комплекса РФ является обеспечение надежности и безопасности эксплуатации трубопроводных систем, общая протяженность которых составляет более 1,5 млн км [1]. В частности, в настоящее время изоляционные покрытия 70 % линейной части трубопроводов не соответствуют требованиям действующих строительных норм и правил, что предопределяет необходимость проведения их срочного капитального ремонта. В то же время, широко используемые в отрасли полимерные покрытия, которые наносят на внешнюю поверхность труб в процессе ремонта, как правило, не обеспечивают длительную защиту трубопроводов вследствие жестких условий их эксплуатации, сочетающих в себе воздействие коррозионных сред и механических нагрузок различной природы. Характерными дефектами покрытий, возникающими в таких условиях, являются отслоение, нарушение сплошности, деградация структуры, а также развитие тех дефектов, которые возникли из-за несоблюдения технологии ремонта [2]. В связи с этим становится очевидной актуальность создания новых изоляционных покрытий с более высокими технологическими характеристиками. Отметим, что важной сопутствующей задачей является разработка научных основ и технологий улучшения свойств уже известных покрытий, поскольку решение данной задачи позволило бы получить значительный эксплуатационный и экономический эффект на основе существующих технологий и материалов.

В последние годы довольно широкое применение стало находить электромагнитное излучение СВЧ-диапазона для термообработки грунтов (укрепление грунта в местах прокладки трубопроводов), повышения прочности пенобетона в строительстве, активации различных химических реакций, увеличения селективности катализаторов и т.п. СВЧ-излучение используется также с целью повышения твердости эпоксидного компаунда и улучшения

свойств полиэтилена высокой прочности, что по области применения непосредственно примыкает к изоляционным покрытиям.

Как известно, СВЧ –излучение, по сравнению с другими физическими явлениями (упругие колебания ультразвукового диапазона частот, инфракрасное излучение, виброобработка и т.д.), обладает рядом преимуществ: интенсифицирует энергообмен в веществе путем преобразования излучаемой энергии в кинетическую энергию колебаний молекул; обеспечивает равномерность обработки вещества в облучаемом объеме, отсутствие необходимости использования дополнительных ингредиентов для трансформации структуры вещества, высокую стабильность энергетического потока вследствие отсутствия инерционности при варьировании его мощности. Именно эти особенности природы СВЧ-излучения и технологий его применения позволили с успехом использовать данный вид обработки вещества в приведенных выше отраслях науки и производства.

Одним из таких перспективных направлений является обработка полимерных материалов излучением электромагнитного поля СВЧ - частоты, обеспечивающая эффективность взаимодействия СВЧ электромагнитных полей с полимерами [3], при котором достигается значительное улучшение физико-механических свойств по сравнению с другими методами обработки. При взаимодействии СВЧ излучения с полимерами повышается качество готовых изделий, уменьшается влияние термомеханических эффектов, механическая прочность увеличивается в 2 раза, водопоглощение уменьшается в 3 раза [4]. При этом уменьшаются габариты производственных установок, а также улучшаются экономические показатели СВЧ технологии повышения качества изоляционных полимерных покрытий трубопроводных систем. Наряду с этим, СВЧ обработка обладает также следующими преимуществами: отсутствием традиционного теплоносителя; стерильностью процесса и безинерционностью регулирования мощности излучения [5].

В настоящее время отсутствует необходимое высокоэффективное технологическое оборудование, в частности, стационарные и мобильные сверхвысокочастотные установки для модификации полимерных изоляционных материалов, в недостаточной степени разработаны методы расчета таких установок [6], связывающие конструктивные параметры и свойства электромагнитного излучения.

Указанные выше преимущества открывают новые возможности получения модифицированных полимерных изоляционных материалов с заданным комплексом свойств, что и обосновывает актуальность научных исследований и конструкторских разработок в области воздействия СВЧ электромагнитного поля на полимерные материалы.

Данная статья посвящена описанию конструкции и системы автоматизированного управления СВЧ электродинамической установки, а так же приводятся результаты экспериментальных исследований взаимодействия

излучения с изоляционным покрытием. Конструкция мобильной СВЧ установки аналогична конструкции стационарных сверхвысокочастотных установок для модификации полимерных материалов [7], но принципиально отличается возможностью функционирования в трассовых условиях.

Отличительной особенностью конструкции мобильной СВЧ – установки является то, что излучающая система обеспечивает практически полное поглощение энергии СВЧ поля полимерным изоляционным материалом, нанесенным на трубопровод.

Мобильная сверхвысокочастотная установка для модификации полимерных покрытий (рисунок 1) относится к оборудованию для осуществления подготовительных и ремонтных работ. Установка для модификации ленточного изоляционного покрытия на трубопровод содержит магнетроны с излучающей мощностью 900 Вт, ходовой механизм, состоящий из двигателя, привода, зубчатых и цепной передач, роликов, установленных под определенным углом для обеспечения поступательного движения вдоль трубопровода. Движение осуществляется за счет передачи вращательного движения зубчатого колеса, на котором крепятся ролики. Устройство движется с заданной линейной скоростью 0,0083 м/с, в процессе движения происходит облучение изолированной поверхности трубы электромагнитным полем.

Скорость движения установки  $V_k$  и мощность излучения  $P$  для проведения процесса модификации определяются производительностью аппарата:

$$v_k = \frac{G}{D \cdot b \cdot \rho},$$

$$v_k = \frac{l}{\tau}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина трубопровода, м:

$$P = W_{y0} \cdot G = \frac{W_{y0} \cdot l \cdot \pi \cdot D \cdot b \cdot \rho}{2 \cdot \tau} \quad (2)$$

где  $G$  – производительность, кг/с;  $D$  – диаметр трубопровода, м;  $b$  – толщина пленки, м;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Высота камеры определяется как:

$$H = \frac{\sqrt{2}}{2} R \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4}\right) = \frac{R}{\sqrt{2}} \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4}\right) \quad (3)$$

где  $R$  – радиус трубопровода,  $\alpha$  – угол раскрытия рупоров излучающей системы, создающей расширяющийся под углом  $\alpha$  – поток электромагнитного излучения.

Зависимость требуемой мощности излучения от диаметра трубопровода представлена на рисунке 2. Полученные зависимости позволяют определить мощность излучения для проведения модификации полимерного изоляционного материала в процессе нанесения на трубопровод заданного диаметра.

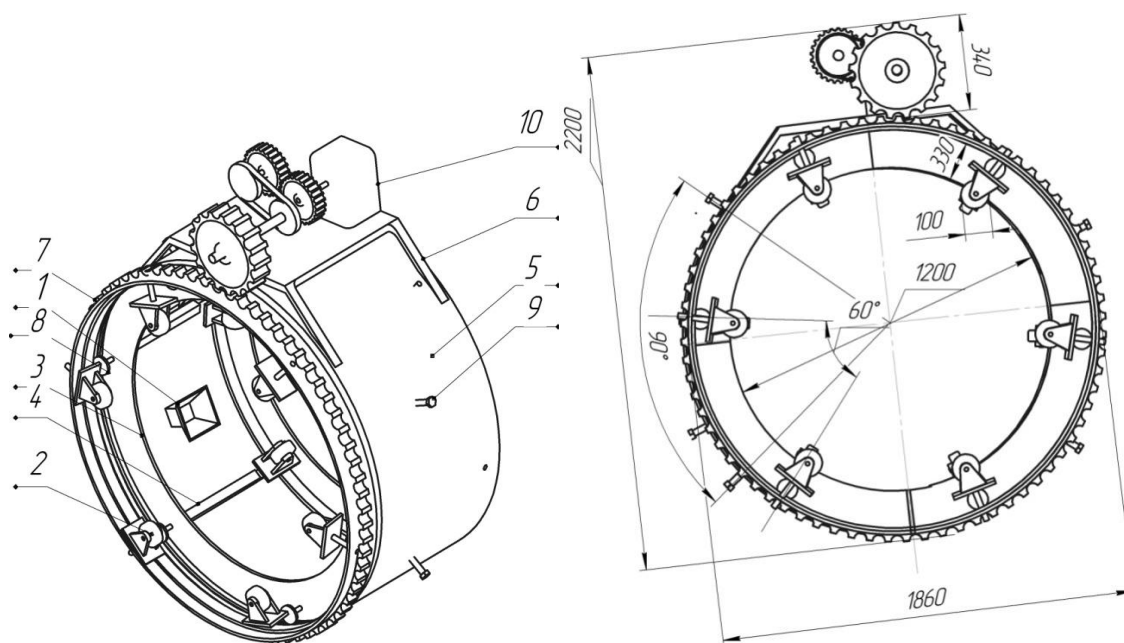


Рисунок 1. Мобильная сверхвысокочастотная установка для модификации полимерных покрытий

1- магнетрон; 2 - ролик с кронштейном; 3- металлическая ширма; 4 - рама;  
5- цилиндрическая обечайка, 6- платформа; 7 - зубчатое колесо;  
8- ролик упорный; 9 - болт; 10 - кожух двигателя

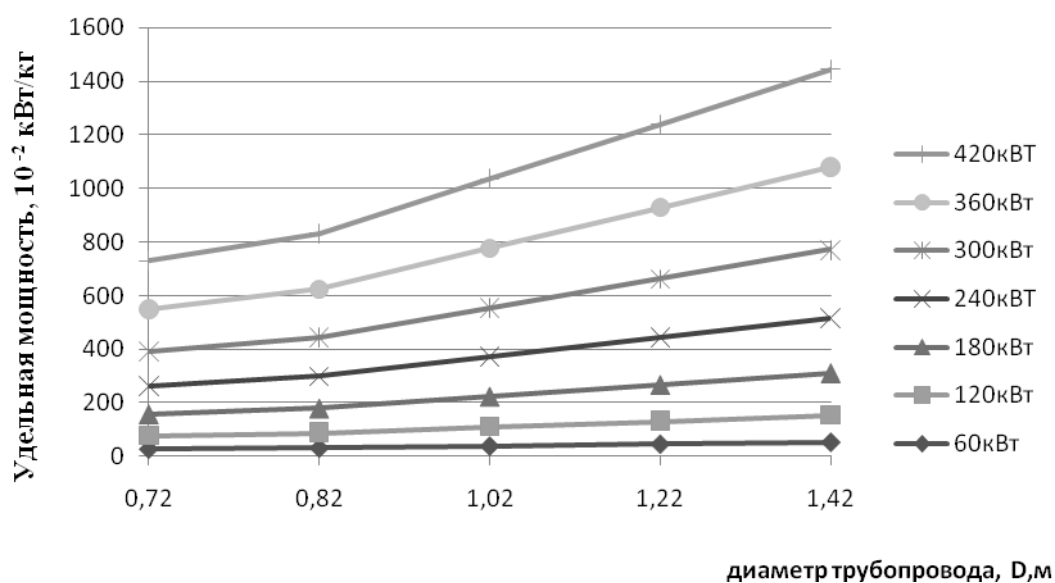


Рисунок 2. Зависимость удельной мощности излучения от диаметра трубопровода (ПВХ пленка)

В результате непрерывного воздействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на полимерные изоляционные покрытия, на поверхности трубопровода установлено, что минимальная часть излучения не поглощенное поливинилхлоридным покрытием отражается от поверхности металла трубопровода, тем самым вызывая его нагрев. В таблице 1 приведены результаты экспериментов по определению температуры.

Таблица 1. Зависимость температуры нагрева поверхности трубопровода от времени СВЧ воздействия

Температура, °С	Время воздействия, с								
	P, Вт	0	60	120	180	240	300	360	420
180	20,00	21,90	23,70	24,90	26,12	26,90	27,65	28,05	
240	20,00	22,62	24,10	25,75	26,60	27,42	28,28	28,78	
300	20,00	23,00	24,90	26,25	27,30	28,50	29,10	29,80	

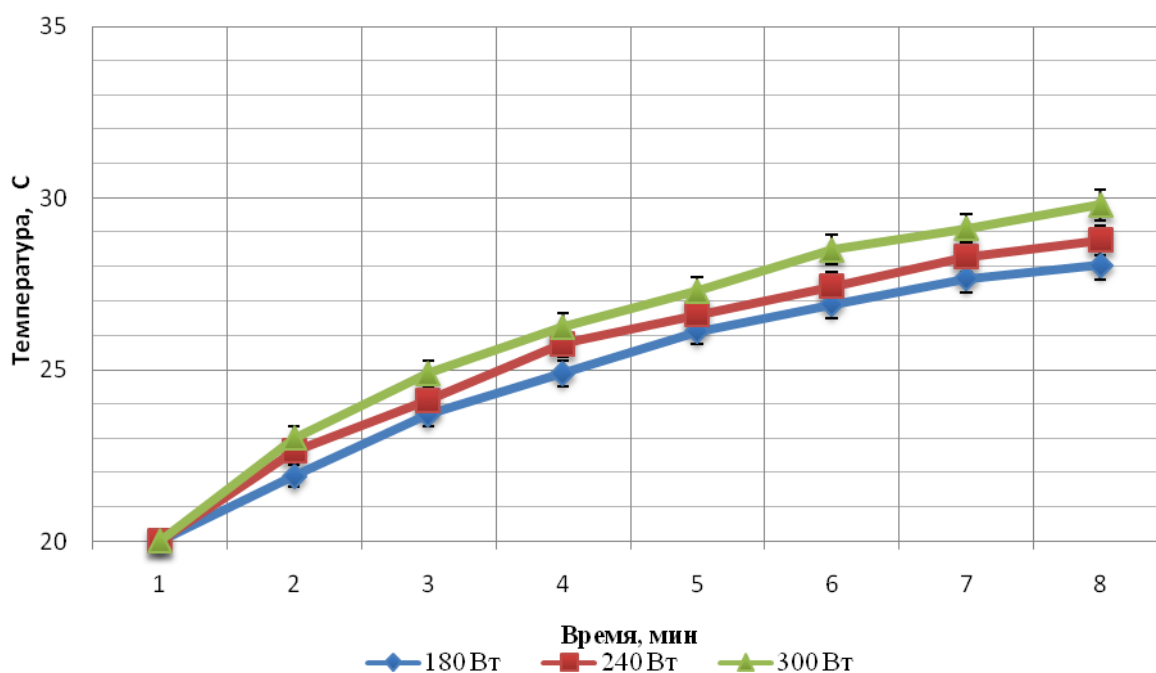


Рисунок 3. Зависимость температуры нагрева поверхности трубопровода от времени СВЧ воздействия

Относительная погрешность отклонения экспериментальных значений температуры от расчетных значений решения не превышает 10%.

Повышение температуры в момент формирования адгезионного контакта вызывает снижение вязкости расплава и способствует достижению более высокой адгезионной прочности. Установлению возможно более полного контакта в

системе полимер - металл препятствуют надмолекулярные образования, существующие в расплавах полимеров. При повышении температуры эти образования разрушаются, что позволяет достижению более полного адгезионного взаимодействия. Повышение температуры не только облегчает достижение адгезионного контакта, но и может приводить к некоторым дополнительным эффектам, например, вызывать появление у адгезива функциональных групп, способствующих повышению адгезии.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено: максимальная адгезионная прочность (рисунок 4) поливинилхлоридного изоляционного покрытия составила 8,86 Н/см при воздействии электромагнитного поля СВЧ – диапазона удельной мощностью излучения 205,8 кДж/кг, которая согласуется с определенной ранее оптимальной мощностью электромагнитного излучения при модификации поливинилхлоридного изоляционного покрытия.

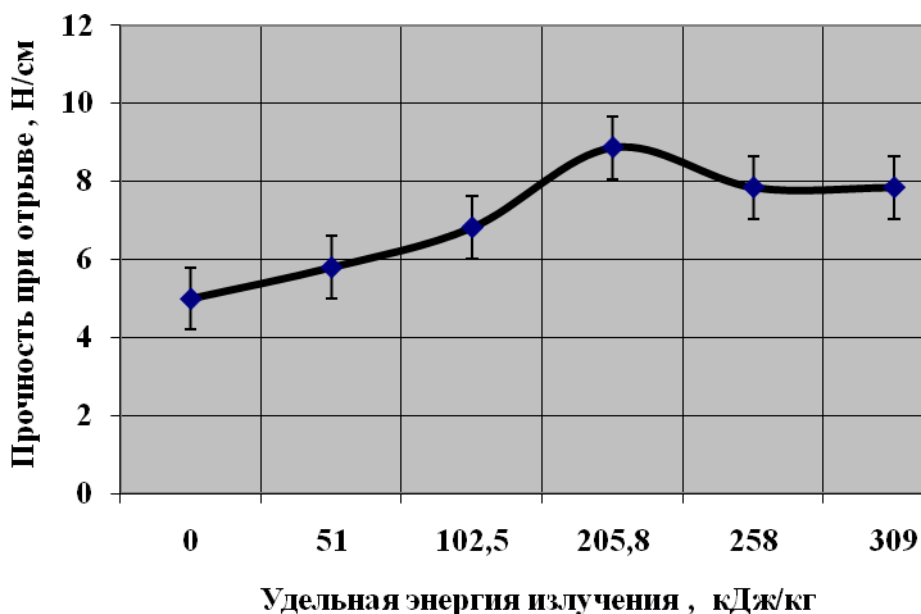


Рисунок 4. Зависимость адгезионной прочности поливинилхлоридного изоляционного покрытия от мощности электромагнитного излучения

Следовательно, использование мобильной СВЧ- установки в процессе нанесения изоляционных полимерных покрытий на поверхность трубопровода повышает надежность их сцепления, адгезию за счет воздействия электромагнитного излучения, что способствует увеличению длительности и надежности эксплуатации трубопроводов.

Для применения СВЧ-установки в процессе модификации изоляционных покрытий на практике, необходимо задать технологические режимы термообработки, которые будут существенно различаться для однородных и неоднородных (двухслойных) материалов. Режимы процесса термообработки определяются эмпирически по результатам экспериментальных исследований.

Для поддержания заданных температурных режимов предлагается автоматизированная система управления мобильной СВЧ – установкой, позволяющая регулировать распределение температуры многослойной структуры материалов, а при необходимости, производить коррекцию времени облучения для достижения заданной температуры на заданной глубине, исполнять операции, обеспечивающие перемещения мобильной СВЧ – установки на заданное расстояние в горизонтальном направлении в моменты окончания циклов облучения фиксированного участка. Численные значения температур, в пределах которых следует производить облучение материалов с целью полной их модификации определяются из экспериментальных исследований зависимости температуры нагрева поверхности трубопровода от времени СВЧ воздействия (таблица 1).

Автоматизированная система управления мобильной СВЧ – установкой в процессе нанесения изоляционного полимерного покрытия на трубопровод необходима для четкого регулирования дозирования СВЧ – излучения по всей поверхности трубопровода, обеспечивающей непрерывное и полное поглощение пленкой электромагнитного излучения.

В SCADA системе Trace Mode разработан программный комплекс для автоматизации и управления. Без подключения контроллера программа использует эмулятор сигналов термодатчика. Программа работает в режиме реального времени. В режиме эмуляции программа определяет температуру  $T_2$  по заданному алгоритму, используя как входные параметры материала (теплоемкость, плотность, диаметр и толщину), а также скорость и мощность излучателя. Температура  $T_1$  окружающей среды принята за  $20^\circ$  и может изменяться.

На стартовом экране программы отображены поля ввода переменных, а также условное изображение модели нагревателя. Условно часть трубы, подвергнутая нагреванию, закрашивается красным цветом, остальная труба и установка – серым цветом.

Как известно:

$$T_2 = T_1 + \frac{Q}{m \cdot c}, \quad (4)$$

где  $T_1$  – температура окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ ;  $Q$  – количество теплоты, Дж;  $m$  – масса нагреваемого участка, кг;  $c$  – удельная теплоемкость:

$$Q = N \cdot t \cdot k = \frac{N \cdot l}{v}, \quad (5)$$

где  $N$  – мощность излучателя, кВт;  $t$  – время воздействия, с;  $l$  – длина облучаемого участка, м;  $v$  – скорость движения нагревателя, м/с;  $k$  – КПД нагревателя, составляет 0,8- 0,9:



$$m = \frac{\rho \cdot \pi \cdot l \cdot (D_{\text{внеш}}^2 - D_{\text{внут}}^2)}{4} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot l \cdot (D_{\text{внеш}} - D_{\text{внут}})(D_{\text{внеш}} + D_{\text{внут}})}{4} \approx \rho \cdot \pi \cdot l \cdot D \cdot h$$

где  $\rho$  – плотность пленки, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  – толщина пленки, м;  $D$  – диаметр трубы, м.

Параметры установки подобраны таким образом, чтобы излучение полностью поглощалось изоляционным покрытием:

$$T_2 = T_1 + \frac{N \cdot l}{v} \cdot \frac{k}{c \cdot \rho \cdot \pi \cdot l \cdot D \cdot h} \quad (6)$$

Объектом рассматривается как звено первого порядка с запаздыванием, время запаздывания составляет, постоянная времени – выбрана за 5 с.

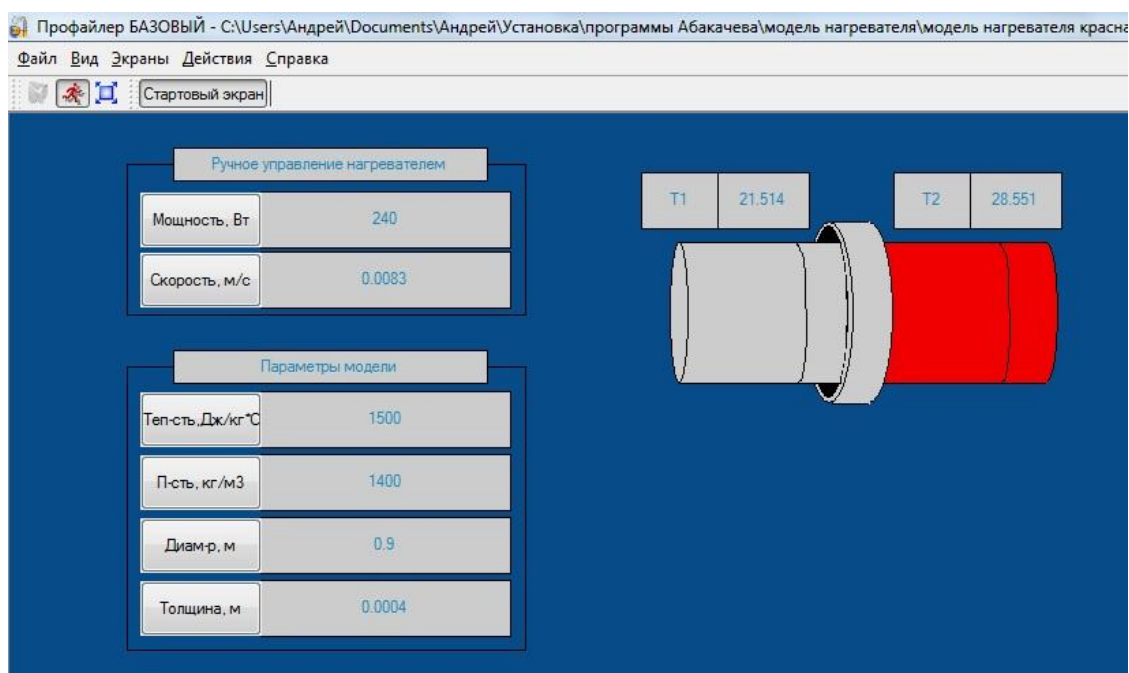


Рисунок 6. Режим эмуляции работы автоматизированной системы управления мобильной СВЧ-установкой

Предложенная автоматизированная система управления мобильной сверхвысокочастотной электромагнитной установкой определяет и задает исполнительным элементам время СВЧ - облучения, необходимое для обеспечения заданных температурных режимов для проведения процесса модификации полимерных материалов в процессе нанесения на трубопровод.

Внедрение СВЧ установки для модификации полимерных материалов является не только технической стороной задачи повышения надежности и длительности безаварийной эксплуатации трубопроводов, но и позволит обеспечить экономическую целесообразность проекта проведения модификации изоляционного покрытия. Экранирование СВЧ излучений от окружающей среды достигается принятием соответствующих технических решений, а выбор структуры СВЧ установки, количества источников СВЧ энергии (магнетронов),

работающих на одну рабочую камеру, проводят с учетом стоимостных показателей материально-технических затрат.

### **Выводы**

1) Разработана мобильная СВЧ установка, управление которой осуществляется в автоматизированном режиме, контролирующем температуру покрытия на основе поддержания, необходимых скорости и продолжительности обработки.

2) Разработанная автоматизированная система управления мобильной СВЧ установкой, основана на использовании математической модели и обеспечивает оптимизацию теплового эффекта по всему объему областей системы «полимерная пленка с клеевой подложкой – праймер – металл» при поглощении СВЧ излучения.

3) Автоматизированная система функционирует с высокой точностью контроля рабочих параметров воздействия на изоляционное покрытие и, тем самым, позволяет получать его равномерную адгезию по всему периметру трубопровода.

### **Литература**

1. Сайфутдинов М.И. Повышение качества капитального ремонта нефтепроводов больших диаметров на основе комплексного обследования и совершенствования изоляционных материалов: дис... канд. техн. наук, Уфа, 2002. 197 с.

2. Харисов Р.А., Мустафин Ф.М., Гаскаров А.И. Анализ причин возникновения дефектов защитных изоляционных покрытий трубопроводов// «Нефтегазовое дело»: науч.-техн. журн. 2009. Т.7. №2. С. 106-111.

3. Калганова С.Г. Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле: дис... д-ра техн. наук. Саратов; Саратовский гос. тех. университет, 2009. 339 с.

4. Абакачева Е.М., Сулейманов Д.Ф. Шулаев Н. С. Исследование физико-механических свойств полимерных материалов, модифицированных в электромагнитном поле СВЧ-диапазона// Бутлеровские сообщения. 2011. Т. 24. №1. С. 95-98.

5. M.V. Hosur, A. Menon, M. K. John, V.K. Rangari, S. Jeelani. Micro wave curing and characterization of nanoclayrein forcedepoxy. // International SAMPE symposium and exhibition, 2005. Vol. 50. P. 1659-1669.

6. Сверхвысокочастотная электромагнитная установка для модификации полимерных пленок / Абакачева Е.М. и др.: пат. РФ на полезную модель № 118818; опубл. 27.07.2012.

7. Абакачева Е.М., Кузеев И.Р., Шулаев Н.С. Исследование кинетики нагрева при модификации полимерных изоляционных материалов в процессе нанесения на трубопровод // Прикладная синергетика III: материалы международ. науч.-техн. конф., посвящ. памяти В.С. Ивановой. Уфа: изд-во УГНТУ, 2012. С. 166-171.

### References

1. Saifutdinov M.I. Povyshenie kachestva kapital'nogo remonta nefteprovodov bol'shikh diametrov na osnove kompleksnogo obsledovaniya i sovershenstvovaniya izolyatsionnykh materialov: dis... kand. tekhn. nauk, Ufa, 2002. 197 s. [in Russian]

2. Kharisov R.A., Mustafin F.M., Gaskarov A.I. Analiz prichin vozniknoveniya defektov zashchitnykh izolyatsionnykh pokrytii truboprovodov// "Neftegazovoe delo": nauch.-tekhn. zhurn. 2009. T.7. №2. S. 106-111. [in Russian]

3. Kalganova S.G. Elektrotekhnologiya neteplovoi modifikatsii polimernykh materialov v SVCh elektromagnitnom pole: dis...d-ra tekhn. nauk. Saratov; Saratovskii gos. tekhn. universitet, 2009. 339 s. [in Russian]

4. Abakacheva E.M., Suleimanov D.F., Shulaev N. S. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv polimernykh materialov, modifitsirovannykh v elektromagnitnom pole SVCh-diapazona// Butlerovskie soobshcheniya. 2011. T. 24. №1. S. 95-98. [in Russian]

5. M.V. Hosur, A. Menon, M. K. John, V.K. Rangari, S. Jeelani. Micro wave curing and characterization of nanoclayrein forcedepoxy. // International SAMPE symposium and exhibition, 2005. Vol. 50. P. 1659-1669.

6. Sverkhvysokochastotnaya elektromagnitnaya ustanovka dlya modifikatsii polimernykh plenok / Abakacheva E.M. i dr.: pat. RF na poleznuyu model' № 118818; opubl. 27.07.2012. [in Russian]

7. Abakacheva E.M., Kuzeev I.R., Shulaev N.S. Issledovanie kinetiki nagreva pri modifikatsii polimernykh izolyatsionnykh materialov v protsesse naneseniya na truboprovod // Prikladnaya sinergetika- III: materialy mezhdunarod. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. pamyati V.S.Ivanovoi. Ufa: izd-vo UGNTU, 2012. S. 166-171. [in Russian]

### Сведения об авторах

Абуталипова Е.М. (Абакачева Е.М), канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудование нефтехимических заводов», ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

E.M. Abutalipova, cand. tech. sci., associate prof. of chair "Petrochemical Equipment", FSBEI NPE USPTU, branch, Sterlitamak, Russian Federation

Кузеев И.Р., д-р техн. наук, проф., зав. кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация  
I.R. Kuzeev, dr. tech. sci., prof., head of chair “Technological machines and equipment”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, Russian Federation

Шулаев Н.С. д-р техн. наук, проф., зав. кафедры «Информатика, математика, физика», ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация  
N.S. Shulaev, dr. tech. sci., professor, head of chair “Informatics, mathematics, physics”, FSBEI NPE USPTU, branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: elena-abakacheva@rambler.ru