

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СНИЖЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ ОПАСНОСТИ НА ТРУБОПРОВОДЫ

**А.Ю. Андриюшкин, кандидат технических наук, доцент.
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова.
В.А. Балабанов, кандидат медицинских наук;
Е.Н. Кадочникова, кандидат технических наук.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Проведен анализ технологических мер по обеспечению высокого качества полимерных покрытий при напылении. Предложена эффективная технология послойного сверхзвукового газодинамического напыления полимерных покрытий. Разобраны аспекты автоматизации технологии послойного напыления полимерных покрытий.

Ключевые слова: покрытие, напыление, автоматизация, трубопровод, углеводороды

RESEARCH OF THE METHODS PROVIDING DECREASE IN FIRE AND INDUSTRIAL DANGER ON PIPELINES

A.Yu. Andryushkin. Baltic state technical university «VOENMEH» named after D.F. Ustinov.
V.A. Balabanov; E.N. Kadochnikova.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The organized analysis of the technological measures on provision high quality polymeric covering at evaporation. Efficient technology of the supersonic gas evaporation layer polymeric covering is Offered. The Parsed aspects to automations to technologies of the evaporation layer polymeric covering.

Keywords: covering, evaporation, automation, pipe line, hydrocarbons

В настоящее время для транспортировки жидких и газообразных углеводородов широко применяют взаимосвязанные трубопроводы, совокупность которых и сопутствующих сооружений представляют собой нефте- и газотранспортные системы. Углеводороды являются взрыво- и пожароопасными веществами и транспортируются большими объемами при повышенном давлении и температуре, поэтому риски возникновения аварии на трубопроводах достаточно велики. Утечки углеводородов при разгерметизации трубопроводов наносят существенный ущерб окружающей среде, при этом возрастает вероятность возникновения взрывов и пожаров. Пары жидких углеводородов тяжелее воздуха, их содержание может довольно быстро достигнуть взрывоопасной концентрации.

Для защиты от воздействий окружающей среды и теплоизоляции стальных трубопроводов используют полимерные покрытия. Широкое применение для нанесения полимерных покрытий из-за своей экономичности и производительности получил технологический метод напыления [1–5].

Процесс напыления и формирования полимерного покрытия характеризуется большим числом технологических параметров, многие из которых варьируются в широком диапазоне значений. Кроме того, на процесс формирования полимерного покрытия влияют различные факторы, которые могут меняться в процессе напыления. Основные процессы

по образованию неоднородности состава и структуры полимерного покрытия происходят на этапах напыления, перемешивания и отверждения компонентов полимерной массы.

Напыленные полимерные покрытия трубопроводов имеют весьма широкий допуск по толщине покрытия, что обусловлено технологией их нанесения. Необходимо отметить, что на многих элементах трубопровода встречаются участки полимерного покрытия, толщина которых превышает нормативные значения. Значительное превышение нормативной толщины полимерного покрытия приводит к уменьшению адгезии покрытия с металлом, также в полимерном покрытии возникают существенные внутренние (остаточные) напряжения (рис. 1) [6, 7]. Чем больше толщина покрытия, тем ниже его способность к деформированию, то есть повышается вероятность возникновения и развития дефектов, наиболее опасными из которых являются трещины, отслаивание, наплывы и отсутствие диэлектрической сплошности.

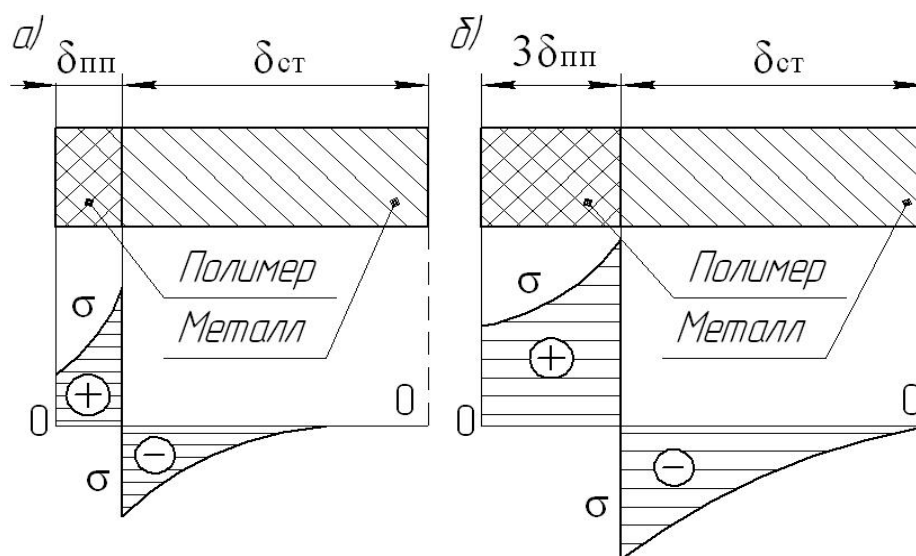


Рис. 1. Распределение внутренних (остаточных) напряжений в полимерном покрытии, напыленном на металл при толщине покрытия δ (а) и 3δ (б)

Температурные перепады. При эксплуатации трубопроводов дефекты полимерного покрытия чаще всего возникают на участках с высокой неоднородностью по структуре и при значительном отличии по составу компонентов покрытия. На этих участках при определенных внешних воздействиях возникают напряжения, превышающие допустимые значения, чаще всего, вследствие влияния отрицательных температур или перепадов температур в течение длительного времени. При отрицательных температурах ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже) многие полимерные покрытия становятся хрупкими и разрушаются при возникновении ударов или существенных деформациях конструкции элементов трубопровода. Резкие суточные перепады температуры воздуха, нагрев покрытия солнечным излучением, изменение температуры транспортируемого углеводорода также приводит к появлению напряжений, вызывающих возникновение дефектов и их ускоренное развитие. Необходимо также отметить, что термические напряжения усиливаются еще за счет различия коэффициентов теплового расширения полимера и металла [5, 8].

Микротрещины в адгезионном слое, находящемся на границе полимера и металла, возникают за счет его охрупчивания в результате длительного действия отрицательных температур. Нагрев адгезионного слоя до температуры, близкой к температуре размягчения полимера, обуславливает сдвиг покрытия под влиянием напряжений с нарушением адгезионных связей. Температурные колебания, вызывающие охрупчивание и размягчение адгезионного слоя, приводят к зарождению и росту дефектов, причем количество дефектов и интенсивность их развития зависит от продолжительности и амплитуды температурных

колебаний. Установлено, что с увеличением толщины полимерного покрытия его стойкость к возникновению дефектов при термоциклировании уменьшается. Например, для полиуретановых покрытий высокая морозостойкость обеспечивается при толщине покрытия не более 4,5 мм [3–6, 8].

Температурные колебания приводят к разрыву макроцепей (деструкции) полимера, возникающие при этом свободные радикалы способствуют лавинообразному разрушению макроцепей. При низких температурах способность рекомбинации свободных радикалов резко снижается, деструкция полимера под действием свободных радикалов проходит значительно интенсивнее. Все это приводит к резкому уменьшению молекулярной массы, появлению хрупкости и быстрому ухудшению эксплуатационных свойств полимера [4, 8].

Смена отрицательных и положительных температур окружающей среды приводит к сорбции и десорбции влаги в полимерном покрытии, ее замораживанию и размораживанию. При замораживании поглощенной воды, находящейся в макро- и микропустотах полимерного покрытия, увеличивается ее объем, что приводит к резкому росту напряжений и зарождению трещин и расслоений [8].

Для исключения участков полимерного покрытия большой толщины необходима более тщательная подготовка поверхности металлического трубопровода перед напылением. Такая подготовка заключается в сглаживании и шлифовании острых кромок, предварительном нанесении на труднодоступные для напыления участки трубопровода материала ручным методом, в использовании на острых кромках и труднодоступных местах армирующих материалов (тканей, сеток).

На адгезию полимера к металлу влияет подготовка стальной поверхности трубопровода. Загрязнения на поверхности металла значительно уменьшают адгезию полимера к металлу. Поэтому перед напылением необходимо удалять загрязнения с поверхности трубопровода специальными растворами с последующей обработкой горячей обессоленной водой. Также рекомендуется для многих полимерных покрытий перед их напылением грунтовать поверхность трубопровода [3–6].

Снижение разнотолщинности полимерного покрытия возможно путем изменения технологии напыления и отверждения полимерной массы, а именно:

- формирование полимерного покрытия заданной толщины из нескольких элементарных слоев (послойное напыление), то есть постепенное увеличение толщины покрытия до номинального значения;
- толщина элементарного слоя полимерного покрытия не должна превышать критического значения, при котором начинается стекание неотвержденной полимерной массы под действием силы тяжести;
- повышение дисперсности частиц формирующих элементарные слои полимерного покрытия, что приводит к повышению однородности полимерной массы и более полному протеканию химических реакций между ее компонентами, и, как следствие, к уменьшению остаточных напряжений в отвержденном полимерном покрытии и росту его прочности.
- уменьшение пятна напыления факела распыления до размеров, при которых кривизна поверхности не оказывает существенного влияния на толщину напыляемого полимерного слоя покрытия;
- траектория перемещения распылителя вдоль трубопровода должна обеспечивать положение, при котором его ось перпендикулярна к напыляемой поверхности или положение близкое к этому;
- изменение пространственного положения трубопровода относительно направления действия силы тяжести во время отверждения полимерной массы, например, вращение трубопровода вокруг оси.

Таким образом, применение технологии послойного напыления целесообразно при формировании полимерного покрытия с малой разнотолщинностью на трубопроводах со сложной геометрической конфигурацией поверхностей.

Недостатком технологии послойного напыления является снижение производительности и рост трудоемкости, связанные с увеличением числа проходов распылителя, пропорциональное числу элементарных слоев в покрытии, а также обусловленные уменьшением диаметра пятна напыления. При этом возникает необходимость в задании и контроле большого числа технологических параметров процесса напыления. Поэтому обеспечение требования малой разнотолщинности полимерного покрытия при послойном напылении требует автоматизации процесса послойного напыления и применения прогрессивных технологических методов напыления. Например, таким перспективным технологическим методом является сверхзвуковое газодинамическое напыление, заключающееся в получении и перемешивании высокодисперсных частиц компонентов полимерной массы в сверхзвуковом факеле распыления при многоструйной подаче распыляющего газа.

Таким образом, технология послойного сверхзвукового газодинамического напыления характеризуется высокой производительностью при высоком качестве полимерного покрытия [9–11].

Автоматизированное напыление имеет следующие преимущества:

- повышение производительности;
- повышение качества полимерного покрытия (отсутствие недопустимых дефектов);
- уменьшение разнотолщинности полимерного покрытия;
- экономия компонентов полимерного покрытия за счет сокращения непроизводительных потерь (образование аэрозоля);
- сокращение загрязнения окружающей среды;
- повышение уровня пожарной безопасности.

Необходимость автоматизации определяется требуемым качеством покрытия, габаритами и формой трубопровода, а также экономической целесообразностью. Автоматизация напыления полимерных покрытий экономически целесообразна при производительности более 20 000 м² обрабатываемой поверхности в год или при меньших объемах производства из-за необходимости улучшения условий труда и получения высококачественных покрытий.

При выборе схемы напыления полимерного покрытия учитывают следующие факторы: конфигурация трубопровода, толщина покрытия, число слоев покрытия, покрываемая площадь, предварительная обработка поверхностей трубопровода, последующая обработка нанесенного покрытия.

Основными технологическими параметрами при напылении являются (рис. 2):

- расстояние между распылителем и покрываемой поверхностью $L_{расп}$;
- угол между осью распылителя и покрываемой поверхностью $\varphi_{расп}$;
- размеры пятна напыления, определяющие ширину полосы напыления;
- степень перекрытия следующей полосой напыления предыдущей полосы;
- скорость перемещения распылителя $V_{расп}$;
- угол факела распыления $\theta_{расп}$;
- расход напыляемой полимерной композиции $Q_{пк}$.

Основные технологические параметры распыления связаны между собой и изменение одного из них влечет изменение остальных. Например, если распылитель расположен слишком близко к покрываемой поверхности, то уменьшается диаметр пятна напыления, что при постоянном расходе компонентов полимерной композиции и скорости перемещения распылителя приводит к образованию потеков и наплывов. Также распылитель при перемещениях не должен сильно отклоняться от перпендикуляра к покрываемой поверхности, иначе возникает существенная разнотолщинность покрытия, то есть $\varphi_{расп}=90^\circ$. Степень перекрытия следующей полосой предыдущей полосы оказывает существенное влияние на разнотолщинность покрытия. Рекомендуется, что следующая полоса напыления должна перекрывать полосу от предыдущего нанесения на 1/3 [9–11].

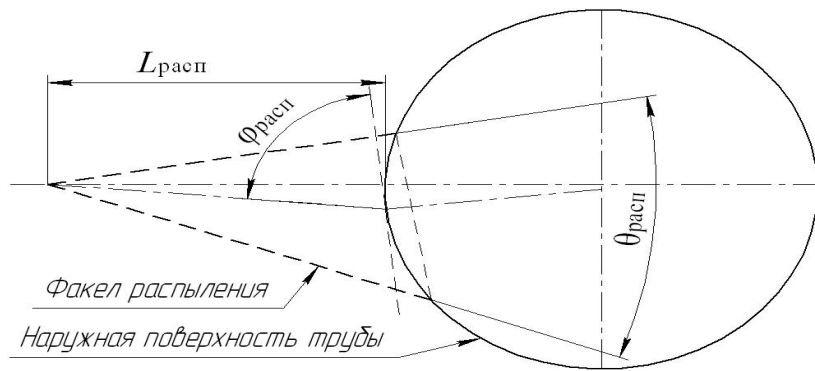


Рис. 2. Напыление полимерного покрытия на наружную поверхность трубы

Для труднодоступных элементов трубопровода, а также для элементов малого диаметра следует использовать распылитель с минимальным углом факела распыления $\theta_{расп}$, чтобы обеспечить минимальную разнотолщинность. Для уменьшения разнотолщинности при напылении полимерного покрытия на изделия сложной конфигурации процесс нанесения начинают с наиболее труднодоступных участков, а затем покрывают более доступные поверхности.

Скорость перемещения распылителя определяют из следующего выражения:

$$V_{расп} = \frac{Q_{пк}}{d_{пн} \cdot \delta_{пн}}, \quad (1)$$

где $V_{расп}$ – скорость перемещения распылителя, м/с; $Q_{пк}$ – объемный расход полимерной композиции, м³/с; $d_{пн}$ – диаметр пятна напыления, м; $\delta_{пн}$ – толщина полимерного покрытия, м.

При перемещении распылителя со скоростью, превышающей расчетную $V_{расп}$, образуются непокрытые участки трубопровода, а со скоростью, ниже расчетной – наплывы и потеки.

Скорость перемещения распылителя $V_{расп}$, как правило, не превышает 1 м/с, чаще всего – близка к 0,5 м/с, соответствующей перемещению распылителя при ручном напылении. При автоматизированном напылении на большие площади для повышения производительности рекомендуется использовать несколько распылителей.

Учитывая форму пятна напыления, на плоской поверхности пятно напыления имеет форму круга диаметром $d_{пн}$ (рис. 3 а), при напылении на трубу – форму эллипса с размерами большой оси $a=d_{пн}$ и малой оси b (рис. 3 б).

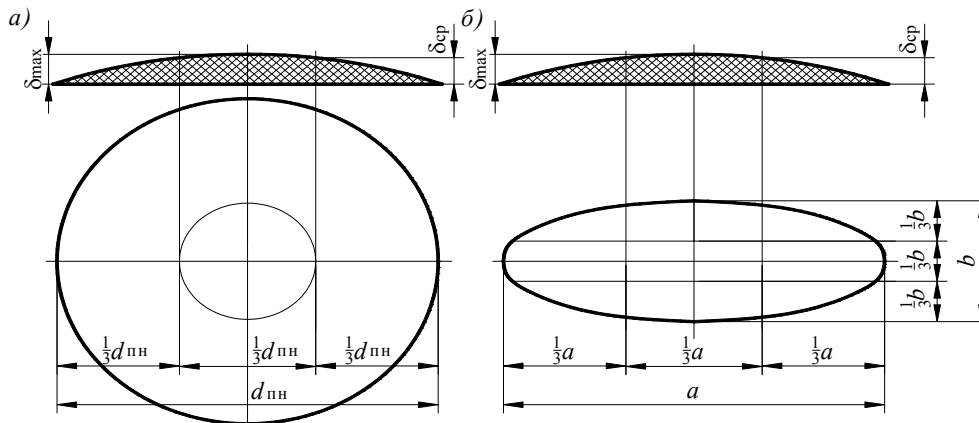


Рис. 3. Конфигурация пятна напыления на плоскую (а) и на выпуклую (б) поверхность: $d_{пн}$ – диаметр пятна напыления; a – длина большой оси эллипса; b – длина малой оси эллипса; δ_{max} – максимальная толщина слоя покрытия; $\delta_{ср}$ – средняя толщина слоя покрытия

Для достижения равномерной толщины покрытия шаг между проходами распылителя (рис. 4):

– при напылении на плоскую поверхность:

$$t_{\text{расп}} = \frac{2}{3} \cdot d_{\text{пн}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{расп}}$ – расстояние между соседними проходами распылителя, м; $d_{\text{пн}}$ – диаметр пятна напыления, м;

– при напылении на трубу:

$$t_{1\text{расп}} = \frac{2}{3} \cdot a \quad t_{2\text{расп}} = \frac{2}{3} \cdot b, \quad (3)$$

где $t_{1\text{расп}}$ – расстояние между соседними проходами распылителя в направлении большой оси эллипса, м; a – длина большой оси эллипса, м; $t_{2\text{расп}}$ – расстояние между соседними проходами распылителя в направлении малой оси эллипса, м; b – длина малой оси эллипса, м.

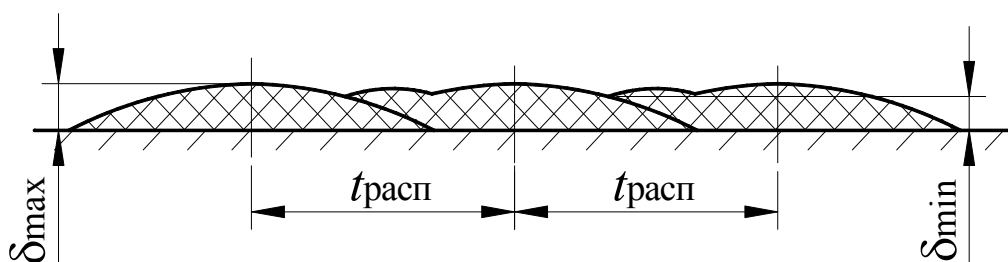


Рис. 4. Сечение напыленного слоя полимерного покрытия:

δ_{max} – максимальная толщина слоя покрытия; δ_{min} – минимальная толщина слоя покрытия;
 $t_{\text{расп}}$ – расстояние между двумя проходами распылителя

При шаге между соседними проходами распылителя, определенным по выражениям (2) или (3), минимальная толщина полимерного покрытия составляет $\delta_{\text{min}} = 0,88 \cdot \delta_{\text{max}}$. Необходимо отметить, что при многослойном нанесении покрытия с ростом числа слоев разница между минимальной и максимальной толщиной покрытия сокращается. Так как жидкая полимерная масса заполняет впадины, образовавшиеся при напылении предыдущего слоя, между соседними проходами распылителя, и, наоборот, убывает в местах с максимальной толщиной. Таким образом, увеличение числа слоев полимерного покрытия способствует уменьшению его разнотолщинности.

Потери компонентов покрытия на образование аэрозоля зависят от их свойств (вязкость, поверхностное натяжение) и технологических параметров процесса распыления (скорость истечения газа, геометрия сопла подачи распыляющего газа). Потери при автоматизированном напылении составляют 10...15 %, а при ручном – 20...25 %. Экспериментально долю потерь компонентов покрытия на образование аэрозоля для конкретного распылителя определяют по методике ГОСТ 20223–74.

Важную роль при формировании качественного покрытия играет дисперсность напыляемых частиц компонентов полимерного покрытия. Очень высокая дисперсность частиц приводит к возрастанию непроизводительных потерь материала из-за образования

аэрозоля, то есть для обработки определенной площади потребуется увеличенный расход компонентов полимерного покрытия. Чрезмерное образование аэрозоля также негативно влияет на окружающую среду и повышает уровень пожарной опасности. Низкая дисперсность напыляемых частиц компонентов полимерного покрытия обуславливает большую разницу в соотношении компонентов по объему полимерной массы, что существенно снижает полноту реакций и взаимодействий в полимерной массе, а, следовательно, является причиной зарождения и развития дефектов полимерного покрытия, уменьшающего прочность. Из практики известно, что качественные полимерные покрытия образуются при диаметре напыляемых частиц $10^{-5} \dots 10^{-4}$ м, при этом непроизводительные потери материала незначительны [9–11].

Таким образом, автоматизированное послойное напыление полимерного покрытия исключает влияние человеческого фактора на процесс и обеспечивает его высокое качество – минимальную разнотолщинность и высокую однородность состава полимерного покрытия.

В настоящее время широкое распространение в качестве антикоррозионной и теплоизоляционной защиты стальных трубопроводов для транспортировки углеводородов получили напыленные полимерные покрытия. Основными причинами снижения качества напыленных полимерных покрытий являются возникновение и развитие дефектов из-за существенной разнотолщинности покрытия, обусловленной технологией нанесения и сложной геометрической конфигурацией поверхностей трубопровода, а также температурных перепадов, возникающих при его эксплуатации.

На участках трубопровода со сложной геометрической конфигурацией поверхностей из-за неблагоприятного сочетания технологических параметров напыления и внешних факторов толщина полимерного покрытия может в несколько раз превосходить номинальное значение, что приводит к резкому возрастанию внутренних напряжений в полимерном покрытии. Технология послойного сверхзвукового газодинамического напыления обеспечивает высокую однородность формируемой полимерной массы и малую разнотолщинность полимерного покрытия, что обуславливает высокое качество полимерного покрытия. Автоматизированное послойное напыление полимерного покрытия обеспечивает высокое качество, характеризующиеся минимальной разнотолщинностью и высокой однородностью состава полимерного покрытия.

Таким образом, автоматизированная технология послойного напыления имеет высокую эффективность, так как позволяет формировать полимерные покрытия трубопроводов для транспортировки углеводородов высокого качества и с высокой производительностью, при незначительных потерях компонентов полимера.

Литература

1. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: учеб. / В.Н. Демехин [и др.]. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2003. 656 с.
2. ГОСТ Р 51164–98. Трубопроводы стальные магистральные общие требования к защите от коррозии. М.: Изд-во стандартов, 1998. 43 с.
3. Зиневич А.М., Козловская А.А. Антикоррозионные покрытия. М.: Стройиздат, 1989. 112 с.
4. Борисов Б.И. Защитная способность изоляционных покрытий подземных трубопроводов. М.: Недра, 1987. 123 с.
5. Протасов В.Н. Полимерные покрытия в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1985.
6. Басин В.Е. Адгезионная прочность. М.: Химия, 1981. 208 с.
7. Сопrotивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г.С. Варданян [и др.]. М.: АСВ, 1995. 572 с.
8. Филатов И.С. Климатическая устойчивость полимерных материалов. М.: Наука, 1983. 216 с.

9. Андрюшкин А.Ю. Формирование дисперсных систем сверхзвуковым газодинамическим распылением: монография. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2012. 400 с.
10. Андрюшкин А.Ю. Напыление покрытий сверхзвуковым газодинамическим методом // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2009»: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 2009. Т 2. С. 289–293.
11. Андрюшкин А.Ю. Перемешивание компонентов технологических смесей // Межотраслевой научно-технический журнал «Конструкции из композиционных материалов». 2011. № 4. С. 19–37.

References

1. Zdaniya, sooruzheniya i ih ustojchivost' pri pozhare: ucheb. / V.N. Demekhin [i dr.]. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2003. 656 s.
2. GOST R 51164–98. Truboprovody stal'nye magistral'nye obshchie trebovaniya k zashchite ot korrozii. M.: Izd-vo standartov, 1998. 43 s.
3. Zinevich A.M., Kozlovskaya A.A. Antikorrozionnye pokrytiya. M.: Strojizdat, 1989. 112 s.
4. Borisov B.I. Zashchitnaya sposobnost' izolyacionnyh pokrytij podzemnyh truboprovodov. M.: Nedra, 1987. 123 s.
5. Protasov V.N. Polimernye pokrytiya v neftyanoj promyshlennosti. M.: Nedra, 1985.
6. Basin V.E. Adgezionnaya prochnost'. M.: Himiya, 1981. 208 s.
7. Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti / G.S. Vardanyan [i dr.]. M.: ASV, 1995. 572 s.
8. Filatov I.S. Klimaticheskaya ustojchivost' polimernyh materialov. M.: Nauka, 1983. 216 s.
9. Andryushkin A.Yu. Formirovanie dispersnyh sistem sverhzvukovym gazodinamicheskim raspyleniem: monografiya. SPb.: BGTU «VOENMEKH», 2012. 400 s.
10. Andryushkin A.Yu. Napylenie pokrytij sverhzvukovym gazodinamicheskim metodom // Problemy i perspektivy razvitiya aviacii, nazemnogo transporta i ehnergetiki «ANTEH-2009»: materialy V Vseros. nauch.-tekhn. konf. Kazan': Kazan. gos. tekhn. un-t, 2009. T 2. S. 289–293.
11. Andryushkin A.Yu. Peremeshivanie komponentov tekhnologicheskikh smesey // Mezhotraslevoj nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov». 2011. № 4. S. 19–37.