

УДК 620.19

О.О. Штырев¹, e-mail: olegshtyr91@gmail.com

¹ Лаборатория конструирования и испытания полимерных покрытий нефтегазового оборудования и сооружений ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (Москва, Россия).

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ВНУТРЕННЕГО ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ТРУБ НЕФТЯНОГО СОРТАМЕНТА ГИДРОАБРАЗИВНОМУ ИЗНОСУ ПРИ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ И ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Одним из основных требований, предъявляемых к внутреннему полимерному покрытию труб нефтяного сортамента, является сопротивление покрытия разрушению при воздействии абразивосодержащего потока жидкости. Показателем сопротивления покрытия разрушению в этих условиях является скорость уменьшения толщины покрытия. При воздействии на материал покрытия потока абразивосодержащей жидкости могут развиваться два принципиально разных механизма изнашивания: абразивный и усталостный. Абразивный механизм изнашивания материала покрытия заключается в срезании твердой абразивной частицей определенного объема материала поверхностного слоя при каждом цикле воздействия этой частицы на материал. Усталостный механизм изнашивания заключается в многократном деформировании абразивными частицами поверхностного слоя материала, что приводит к растрескиванию и выкрошиванию циклически нагружаемого объема материала.

Сопротивление материала разрушению при абразивном и усталостном механизмах изнашивания определяется различными механическими свойствами этого материала. При абразивном механизме изнашивания сопротивление материала разрушению возрастает с повышением его твердости. Полимерные материалы и покрытия на их основе не предназначены для использования в условиях абразивного изнашивания. В этом случае следует использовать металлы и сплавы с соответствующими механическими свойствами.

При усталостном механизме изнашивания сопротивление материалов возрастает со снижением их модуля упругости. Это подтверждается высоким сопротивлением разрушению эластомеров в этих условиях.

Известно, что механизм изнашивания материалов существенно зависит от угла атаки абразивосодержащей жидкости и режимов ее течения.

Для объективного моделирования процесса гидроабразивного изнашивания материалов полимерных покрытий при сертификационных и периодических испытаниях в лабораторных условиях и объективной оценки числового значения скорости изменения толщины покрытия в этих условиях важно воспроизвести механизм процесса гидроабразивного изнашивания материала внутреннего покрытия трубной продукции

и оценить степень влияния различных эксплуатационных факторов на скорость этого процесса.

Для подтверждения вышесказанного и обоснования недопустимости использования установок типа Taber Abraser, дающих неправильную информацию о качестве внутреннего покрытия труб нефтяного сортамента, в РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина была разработана методика испытаний полимерных покрытий на гидроабразивный износ, позволяющая объективно моделировать реальный механизм гидроабразивного изнашивания внутреннего полимерного покрытия трубной продукции, используемой для строительства, реконструкции и ремонта промышленных трубопроводов на нефтяных месторождениях.

Ключевые слова: нефтепроводные трубы, внутренние полимерные покрытия, гидроабразивный износ, лабораторные испытания, моделирование механизма, методика моделирования.

Разнообразные жидкие среды, транспортируемые по нефтепромысловым трубопроводам, колоннам насосно-компрессорных и бурильных труб с внутренним полимерным покрытием, содержат значительное количество механических примесей, что вызывает интенсивный гидроабразивный износ материала покрытия. Вследствие этого значительно уменьшается толщина покрытия и, как результат, нарушается его работоспособность. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к внутреннему полимерному покрытию труб нефтяного сортамента, является сопротивление покрытия разрушению при воздействии абразивосодержащего потока жидкости. Показателем сопротивления покрытия разрушению в этих условиях является скорость уменьшения толщины покрытия. Известно, что при гидроабразивном изнашивании конструкционных материалов могут развиваться два принципиально разных механизма изнашивания: абразивный и усталостный. Абразивный механизм изнашивания материала заключается в срезании твердой абразивной частицей определенного объема материала поверхностного слоя при каждом цикле воздействия этой частицы на материал. Подобный процесс аналогичен обработке материалов резанием.

Усталостный механизм изнашивания заключается в многократном деформировании абразивными частицами поверхностного слоя материала, что приводит к растрескиванию и выкрошиванию циклически нагружаемого объема материала. Развитие абразивного или усталостного механизма изнашивания существенно зависит от энергии удара абразивной частицы, определяемой ее массой и скоростью потока абразивосодержащей жидкости, углом атаки абразивных частиц по отношению к поверхности материала, прочностными и деформационными характеристиками изнашиваемого материала, определяющими энергию активации процесса его разрушения. Сопротивление материала разрушению при абразивном и усталостном механизмах изнашивания определяется различными механическими свойствами этого материала.

При абразивном механизме изнашивания сопротивление материала разрушению возрастает с повышением его твердости. Полимерные материалы и покрытия на их основе не предназначены для использования в условиях абразивного изнашивания. В этом случае следует использовать металлы и сплавы с соответствующими механическими свойствами.

При усталостном механизме изнашивания сопротивление матери-

алов возрастает со снижением их модуля упругости. Это подтверждается высоким сопротивлением разрушению эластомеров в этих условиях.

Механизм разрушения материалов при гидроабразивном изнашивании существенно зависит от угла атаки потока абразивосодержащей жидкости. При малых углах атаки преобладает абразивный механизм изнашивания. Однако для его развития необходима достаточная скорость течения абразивосодержащей жидкости, обеспечивающая необходимую энергию воздействия абразивной частицы на материал для его срезания с поверхности. При больших углах атаки преобладает усталостный механизм изнашивания материалов.

Существенное влияние угла атаки на скорость уменьшения толщины внутреннего полимерного покрытия нефтепромысловых трубопроводов подтверждается результатами контроля технического состояния этого покрытия диагностическими комплексами. Установлено, что наиболее интенсивное разрушение внутреннего полимерного покрытия трубопровода происходит на участках изменения направления потока транспортируемой абразивосодержащей жидкости, т. е. в местах установки фасонных изделий трубопроводов (отводов и тройников).

Для объективного моделирования процесса гидроабразивного изнашивания материалов полимерных покрытий при сертификационных и периодических испытаниях в лабораторных условиях и объективной оценки в этих условиях числового значения скорости изменения толщины покрытия важно воспроизвести механизм процесса гидроабразивного изнашивания материала внутреннего покрытия трубной продукции и оценить степень влияния различных эксплуатационных факторов на скорость этого процесса.

В ранее опубликованной тем же автором статье [1], посвященной механизму гидроабразивного изнашивания материалов внутреннего полимерного покрытия труб нефтяного сортамента, достаточно убедительно была обоснована недопустимость использования установки Taber Abraser и подобных ей для контроля сопротивления материалов полимерных покрытий гидроабразивному износу. Данный тип установок моделирует абразив-

ный механизм изнашивания материалов закрепленным абразивом, аналогом шлифовального круга. Автор статьи предполагал, что донес до специалистов испытательных лабораторий, проводящих периодические испытания внутреннего полимерного покрытия нефтепроводных труб, информацию о недопустимости испытаний на установках типа Taber Abraser, дающих неверную информацию о качестве покрытия. Однако ничего не изменилось, и подобные испытания продолжают. Вероятно, это объясняется некомпетентностью специалистов лабораторий в области гидроабразивного износа. Целью данной статьи является донесение до нефтяных компаний информации о несоответствии условий контроля сопротивления внутренних полимерных покрытий трубной продукции износу на установке Taber Abraser при периодических испытаниях в лабораторных условиях реальным воздействиям на это покрытие. Следствием подобного несоответствия является

низкий срок службы трубной продукции с полимерным покрытием при высокой ее стоимости.

Для подтверждения вышесказанного в РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина была отработана методика испытаний полимерных покрытий на гидроабразивный износ, позволяющая объективно моделировать реальный механизм гидроабразивного изнашивания внутреннего полимерного покрытия трубной продукции, используемой для строительства, реконструкции и ремонта промышленных трубопроводов на нефтяных месторождениях.

Испытания проводятся на струйно-абразивной установке, схема которой представлена на рис. 1. Установка позволяет изменять в широком диапазоне скорость течения абразивосодержащей жидкости, концентрацию механических примесей в ней, угол атаки по отношению к поверхности покрытия. В качестве модельной абразивосодержащей среды используют воду, содержащую требуемую концентрацию кварцевого песка с размером частиц 150–250 мкм.

При отработке методики испытаний определяют максимально допустимую продолжительность испытаний образцов с покрытием на износ в абразивосодержащей жидкости без ее замены, определяемую временем сохранения размера абразивных частиц более 100 мкм при исходном значении 100–250 мкм. Для этого через каждый час испытаний образцов с покрытием на гидроабразивный износ при заданной скорости истечения струи абразивосодержащей жидкости отбирают пробу абразивосодержащей жидкости и определяют интервал времени, в течение которого масса абразивных частиц, оставшихся на сетке сита с размером ячеек 100 мкм, составляет не менее 80 % от общей массы частиц в отобранной пробе.

В таблице приведены результаты исследования влияния продолжи-

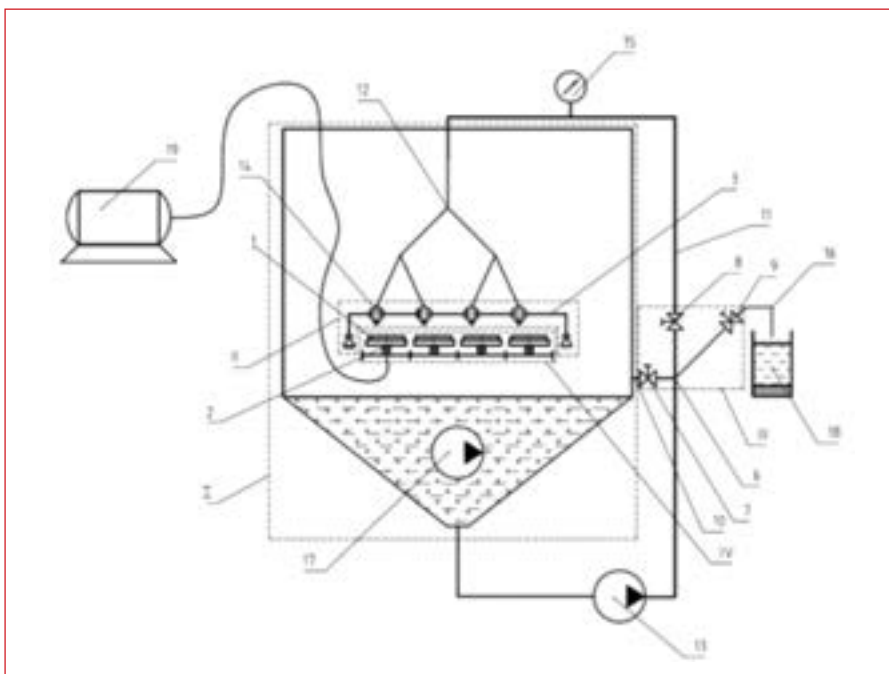


Рис. 1. Схема установки для испытаний материалов покрытия на гидроабразивный износ:

I – бак конический; II – блок сопел; III – распределительный блок; IV – блок вращения столиков; 1 – образец; 2 – столик; 3 – держатель сопел; 6 – крестовина; 7 – кран байпасной линии; 8 – кран напорной линии; 9 – кран для отбора пробы; 10 – байпасная линия; 11 – напорная линия; 12 – Y-образный тройник; 13 – насос; 14 – сопло; 15 – манометр; 16 – линия отбора пробы; 17 – перемешивающий насос

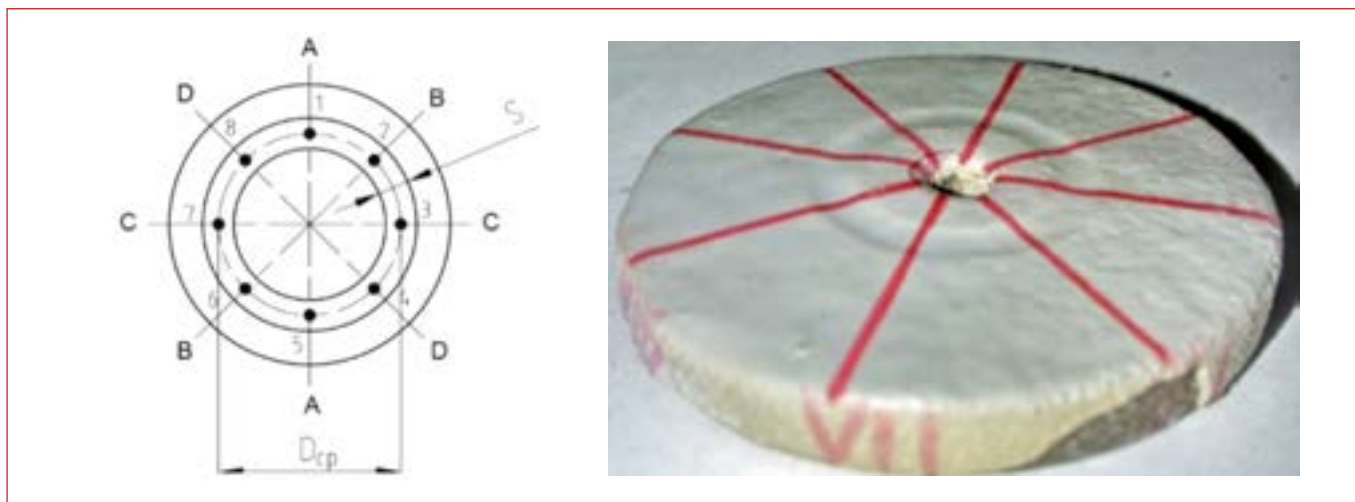


Рис. 2. Схема контроля толщины образца с покрытием по периметру канавки, образующейся в результате износа, и по заданным координатным осям: А–А, В–В, С–С, Д–Д

тельности испытания покрытия на гидроабразивный износ на процентное содержание абразивных частиц размером до 100 мкм в отобранной пробе. Из приведенных данных видно, что продолжительность испытаний до 2 ч соответствует установленной норме.

В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЙ КОНТРОЛИРУЮТ СЛЕДУЮЩИЕ РЕЖИМЫ:

- давление в напорной линии, определяющее скорость истечения абразивосодержащей жидкости;
- концентрацию абразива в абразивосодержащей жидкости.

Контроль концентрации абразива в отобранной пробе проводят после приготовления абразивосодержащей жидкости, т. е. перед проведением предварительных испытаний образцов на износ, затем перед началом основных испытаний образцов на износ и, наконец, после окончания основных испытаний образцов на износ. Полученные значения концентрации не должны различаться более чем на 5 %. Перед испытаниями на гидроабразивный износ на поверхность испытываемого покрытия наносят с помощью трафарета фломастером координатные линии, вдоль которых необходимо контролировать относительное изменение глубины канавки образца с покрытием,

образующейся при проведении испытаний материала покрытия на сопротивление гидроабразивному износу (рис. 2). На установке одновременно испытывают в одном и том же режиме 4 образца. В результате измерений глубины канавки по средней линии канавки, образующейся в результате испытаний, по 8 координатным осям получают 8 значений глубин канавки после испытаний на износ каждого образца. Измерение глубины канавки производят с помощью индикатора с точностью деления до 1 мкм и пределом измерения 1 мм в самой глубокой точке канавки по заданным координатам в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2. Общее количество полученных значений глубин канавки по заданным координатам четырех одновременно испытанных образцов с покрытием равно 32, что позволяет после статистической обработки результатов измерений определить скорость уменьшения толщины покрытия с требуемой вероятностью. Для установления функциональной зависимости скорости уменьшения толщины полимерного покрытия от скорости течения абразивосодержащей жидкости с целью последующего расчета срока службы защитного покрытия при реальных скоростях течения абразивосодержащей жидкости в трубопрово-

дах и колоннах труб в скважинах проводят испытания образцов с покрытием на гидроабразивный износ при скоростях течения струи абразивосодержащей жидкости 12,78; 15,0; 17,68; 20,8; 22,0; 24,0 и 26,0 м/с и заданной концентрации кварцевого песка.

Для установления функциональной зависимости скорости уменьшения толщины полимерного покрытия от концентрации кварцевого песка в абразивосодержащей жидкости проводят испытания на гидроабразивный износ образцов с покрытием при концентрации кварцевого песка 1,0; 3,0; 5,0; 7,0 и 9,0 % и заданной скорости течения струи.

Для установления функциональной зависимости скорости уменьшения толщины полимерного покрытия от угла атаки потока абразивосодержащей жидкости по отношению к поверхности покрытия проводят испытания на гидроабразивный износ образцов при углах атаки 15; 30; 45; 60; 75 и 90° и заданных значениях скорости течения абразивосодержащей жидкости и концентрации кварцевого песка.

На основании статистической обработки экспериментальных данных строят графики следующих зависимостей: скорости уменьшения толщины полимерного покрытия от скорости потока абразивосодержащей жидкости; скорости

Результаты влияния продолжительности испытания материала покрытия на гидроабразивный износ на процентное содержание абразивных частиц размером до 100 мкм в отобранной пробе

Продолжительность испытаний, ч	Общая масса частиц кварцевого песка в отобранной пробе, г	Масса частиц кварцевого песка размером до 100 мкм в отобранной пробе, г	Процентное содержание частиц до 100 мкм в отобранной пробе, %
0,5	496	25	5
1,0	378	32	8,5
1,5	383	35	9,1
2,0	214	30	14

уменьшения толщины защитного покрытия от концентрации кварцевого песка в абразивосодержащей жидкости; скорости уменьшения толщины покрытия от угла атаки потока абразивосодержащей жидкости по отношению к поверхности покрытия.

На рис. 3 представлен график зависимости скорости уменьшения толщины полимерного покрытия на основе эпоксидной порошковой краски П-ЭП-7150 от скорости потока абразивосодержащей жидкости при концентрации кварцевого песка 3 % от объема. График носит нелинейный характер.

Из графика видно, что при увеличении скорости течения абразивосодержащей жидкости до 15 м/с скорость уменьшения толщины покрытия изменяется незначительно. При дальнейшем увеличении

скорости течения абразивосодержащей жидкости интенсивность изменения скорости уменьшения толщины резко возрастает. На основании построенного графика была установлена функциональная зависимость скорости уменьшения толщины полимерного покрытия от скорости потока абразивосодержащей жидкости при постоянной концентрации кварцевого песка 3 % от объема и угле атаки 45°.

$$V_{\delta, \text{исп}} = A \cdot \vartheta_{\text{ж}}^{\beta}, \quad (1)$$

где $V_{\delta, \text{исп}}$ – скорость уменьшения толщины покрытия; $\vartheta_{\text{ж}}$ – скорость потока абразивосодержащей жидкости; A и β – постоянные, зависящие от прочностных и деформационных характеристик покрытия. На рис. 4 представлен график зависимости скорости уменьшения

толщины полимерного покрытия на основе эпоксидной порошковой краски П-ЭП-7150 от концентрации кварцевого песка в абразивосодержащей жидкости при скорости течения струи 26 м/с и угле атаки 45°. График имеет нелинейный характер. С увеличением концентрации кварцевого песка в абразивосодержащей жидкости скорость уменьшения толщины полимерного покрытия возрастает. При концентрации кварцевого песка в абразивосодержащей жидкости до 0,5 % интенсивность уменьшения толщины полимерного покрытия наиболее высока. При больших концентрациях она существенно снижается.

На основании построенного графика была установлена функциональная зависимость скорости уменьшения толщины полимерного покрытия от концентрации кварцевого песка в абразивосодержащей жидкости:

$$V_{\delta, \text{исп}} = \gamma \cdot K^{\lambda}, \quad (2)$$

где K – концентрация кварцевого песка; γ и λ – постоянные, зависящие от прочностных и деформационных характеристик покрытия. На рис. 5 представлен график зависимости скорости уменьшения толщины защитного покрытия от угла атаки потока абразивосодержащей жидкости по отношению к поверхности покрытия при скоростях течения 24,0 и 12,78 м/с и концентрации кварцевого песка 3 %. При скорости потока абразивосодержащей жидкости $\vartheta_{\text{ж}1} = 24$ м/с график зависимости скорости уменьшения толщины покрытия

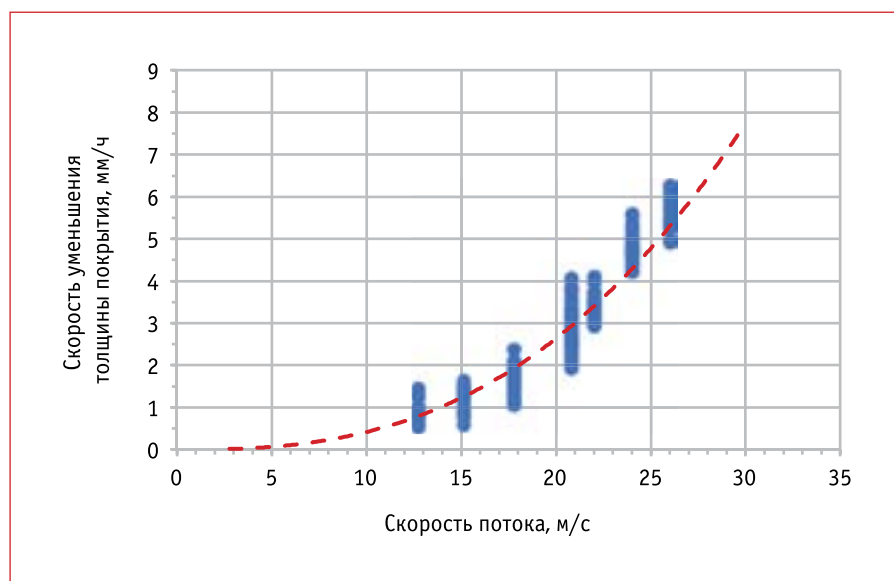


Рис. 3. График зависимости скорости уменьшения толщины покрытия на основе эпоксидной порошковой краски П-ЭП-7150 от скорости потока абразивосодержащей жидкости при концентрации абразива 3 % и угле атаки 45°

от угла атаки носит экстремальный характер. При увеличении угла атаки до $60-70^\circ$ скорость уменьшения толщины покрытия резко возрастает, однако при дальнейшем увеличении угла атаки происходит ее существенное снижение. Подобный характер графика свидетельствует о преобладании абразивного механизма износа материала покрытия при высокой скорости потока абразивосодержащей жидкости.

При более низкой скорости потока абразивосодержащей жидкости $\vartheta_{ж2} = 12,78$ м/с изменение скорости уменьшения толщины покрытия при увеличении угла атаки незначительно. При этом максимальная скорость уменьшения толщины покрытия наблюдается при углах атаки $70-80^\circ$. Снижение интенсивности изменения толщины покрытия при изменении угла атаки и смещение точки экстремума графика в сторону больших углов при скорости течения потока $\vartheta_{ж2} = 12,78$ м/с свидетельствует о преобладании усталостного механизма износа покрытия при более низких скоростях течения абразивосодержащей жидкости.

Необходимо учитывать, что скорость течения транспортируемой среды в нефтесборных трубопроводах и скважинных колоннах труб не превышает 7 м/с. В этих условиях внутреннее полимерное покрытие труб будет подвергаться согласно проведенным исследованиям усталостному износу.

Для моделирования усталостного механизма износа внутреннего полимерного покрытия в лабораторных условиях сертификационные и периодические испытания этого покрытия следует проводить при углах атаки, близких к 90° .

Уравнения (1) и (2) позволяют пересчитать скорость уменьшения толщины внутреннего полимерного

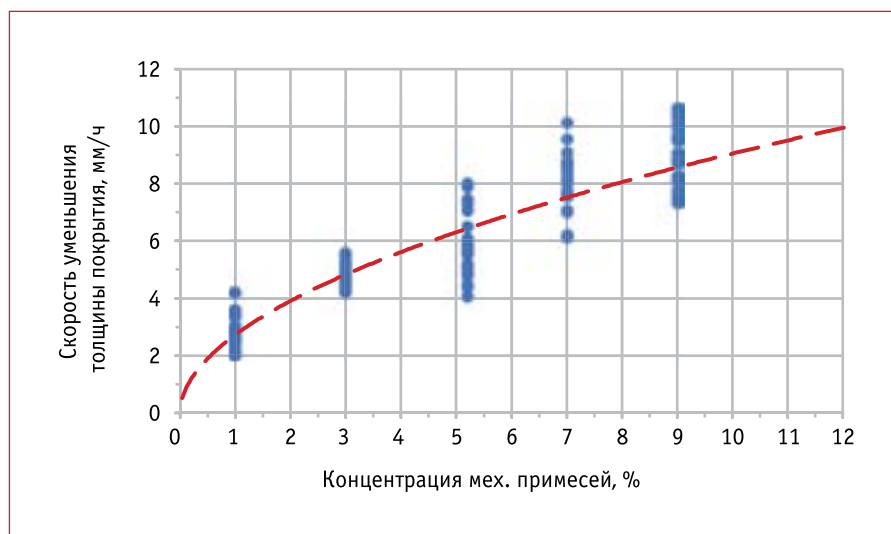


Рис. 4. График зависимости скорости уменьшения толщины покрытия на основе эпоксидной порошковой краски П-ЭП-7150 от концентрации кварцевого песка в абразивосодержащей жидкости при скорости потока 26 м/с и угле атаки 45°

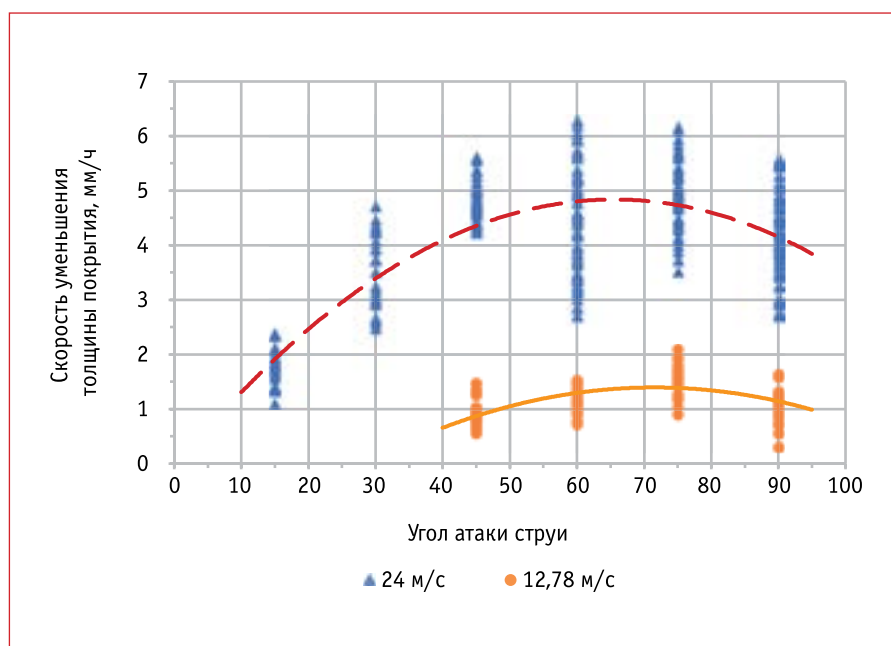


Рис. 5. Графики зависимости скорости уменьшения толщины покрытия от угла атаки струи при скоростях потока абразивосодержащей жидкости $\vartheta_{ж1} = 24$ м/с и $\vartheta_{ж2} = 12,78$ м/с концентрацией абразива 3%:

$\vartheta_{ж1}$ — — — — — ; $\vartheta_{ж2}$ — — — — —

покрытия, установленную в лабораторных условиях при ускоренных испытаниях (скорость потока абразивосодержащей жидкости – 12 м/с и концентрация кварцевого песка – 1%), на скорость уменьшения тол-

щины внутреннего полимерного покрытия труб в реальных условиях при фактических значениях скорости течения транспортируемой среды и концентрации механических примесей в нем.

Литература:

1. Штырев О.О. О недопустимости использования установки Taber Abraser и подобных ей для контроля сопротивления материалов внутренних полимерных покрытий труб нефтяного сортамента гидроабразивному износу при воздействии потока жидкой среды, содержащей механические примеси // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 9. С. 86-90.