ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

ФЕДОТОВА Анна Владимировна
Управляющий ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ», к.т.н.

Полимерные трубопроводы в условиях нефтепромысла испытывают широкий спектр нагрузок: перепады температуры и давления, химическое воздействие агрессивной среды, механические нагрузки (изгиб, сжатие, кручение и др.). Критерии эксплуатационной надежности полимерных материалов с учетом указанных факторов должны быть закреплены в нормативно-технической документации (НТД). Однако на сегодняшний день отраслевая НТД в данной области далеко не совершенна: некоторые документы нуждаются в актуализации, другие находятся в процессе разработки. В таких условиях подтвердить надежность производимого или закупаемого оборудования помогает экспертная оценка.

ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ» проводит научно-исследовательские работы (НИР) различной сложности в интересах производителей и потребителей полимерной продукции. Новейшее испытательное оборудование и большой накопленный опыт позволяют сотрудникам центра разрабатывать уникальные методики для исследования физико-химических свойств различных полимерных материалов.

В статье представлены примеры таких работ. В частности, исследование химической стойкости термопластичных материалов полиэтилена ПЭ-100 и PE-RT, проведенное по заказу ПАО «СИБУР Холдинг».

ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ» – российский научно-исследовательский центр, специализирующийся на испытании полимерной продукции, предназначенной для эксплуатации в нефтегазовом комплексе и других отраслях промышленности. Предприятие оказывает услуги по внедрению и контролю эксплуатации полимерных изделий на нефтегазовых месторождениях, а также участвует в разработке нормативной документации по изготовлению и применению полимерной трубной продукции и строительству объектов с использованием полимерной трубной продукции.

Текущая деятельность центра включает:

- выполнение НИР;
- аттестацию полимерной продукции и композитных материалов на соответствие требованиям НТД;
- разработку методик испытаний полимерных материалов;
- экспертизу отказов трубопроводов и оборудования из полимерных материалов;
- технические аудиты предприятий-изготовителей полимерной продукции;
- испытания физико-химических свойств полимерных материалов.

В число заказчиков исследований, проводимых ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ», входят ведущие российские нефтегазовые предприятия (ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «НК «Роснефть», ООО «Иркутская нефтяная компания» и др.), а также предприятия-производители полимерной продукции (ООО НПП «Завод стеклопластиковых труб», ООО «Татнефть-Пресскомпозит», АО «Полимак» и многие другие).

Партнеры ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ» – ведущие исследовательские центры: ООО «НПЦ «Самара» и ООО «ИТ-Сервис».

Испытательная лаборатория ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ» имеет аккредитацию АО «НТЦ «Промышленная безопасность» для проведения разрушающих и других видов испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» и СДА 15-2009 «Требования к испытательным лабораториям».

ОСОБЕННОСТИ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ

В области производства, эксплуатации и исследования полимерных трубопроводов на сегодняшний день действуют четыре документа и один находится в разработке:

- ГОСТ Р 59834-2021 и ГОСТ Р 59910-2021 регламентируют требования к производству гибких полимерных армированных труб (ГПАТ). Оба документа, по мнению экспертов отрасли, устарели и нуждаются в актуализации;
- ГОСТ Р 70623-2023 и ГОСТ Р 70624-2023 фиксируют правила проектирования, монтажа и эксплуатации промысловых трубопроводов из ГПАТ и полимерных труб, армированных металлическим каркасом. Оба документа нуждаются в доработке.
- ГОСТ, регламентирующий методы испытаний и контроля полимерных трубопроводов, находится в стадии разработки.

ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ» принимает непосредственное участие в разработке и корректировке НТД. Так, по результатам испытаний, проведенных в лаборатории центра, была частично составлена таблица расчетных коэффициентов и физико-механических свойств полимерных армированных труб (ПАТ) для выполнения прочностных расчетов по ГОСТ Р 70623 и ГОСТ Р 70624.

В указанной таблице представлены данные для расчета прочности ГПАТ различных типов:

- армированных металлической лентой несвязной конструкции;
- армированных нитью несвязной конструкции;

На текущий момент планируется крупная НИР по получению характеристик для ГПАТ:

- армированных металлическим кордом связной конструкции;
- армированных стекловолокном связной конструкции
- армированных металлической проволокой.

Рис. 1. Универсальный стенд растяжения/сжатия СРС 300/150



Определение осевой жесткости, модуля упругости и коэффициента Пуассона ПАТ





Учтены такие параметры, как толщина стенки трубы, плотность материала трубы, коэффициент линейного температурного расширения, коэффициент запаса прочности к температуре полимера и др.

Данная таблица была предложена в качестве основы для разработки СТО ИНТИ[1].

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ»

ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ» располагает новейшим оборудованием для проведения испытаний конструкций из полимерных материалов, позволяющим проводить широкий спектр исследований.

Приведем несколько примеров.

Универсальный стенд растяжения/сжатия СРС 300/150 (рис. 1, табл. 1) предназначен для определения осевой жесткости ПАТ, а также модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Изгибающее устройство СГИ-500 (рис. 2, табл. 2) предназначено для определения изгибной жесткости ПАТ.

Таблица 1. Технические характеристики универсального стенда растяжения/ сжатия СРС 300/150

Параметр	Значение
Максимальное усилие на растяжение, тс	300
Максимальное усилие на сжатие, тс	150
Максимальная длина испытуемого образца, м	3

Недавно данное оборудование прошло модернизацию. Обновленное устройство позволяет останавливать и фиксировать нагрузку, измерять и контролировать перемещение и усилие, при котором происходит деформация до разрушения либо деформация на заданный радиус изгиба. На данном оборудовании проводятся, например, исследования по оценке радиуса изгиба по ГОСТ Р 59834 и исследования на циклический изгиб: в зависимости от типа конструкции ГПАТ возможна либо длительная выдержка (1000 ч) после воздействия изгиба, либо испытание на разрушающее давление.

[1] АНО «ИНТИ» – новый отраслевой институт, созданный для консолидации требований и выпуска единой НТД для нефтегазодобывающих обществ. Институт создан по аналогии с американским институтом нефти – API, и есть надежда, что в перспективе он будет выполнять аналогичную функцию своего прототипа. Подробную информацию об организации можно изучить на сайте INTI.expert – Институт нефтегазовых технологических инициатив.

Рис. 2. Изгибающее устройство СГИ-500



Определение изгибной жесткости ПАТ

Таблица 2. Технические характеристики изгибающего устройства СГИ-500

Параметр	Значение
Максимальное усилие на изгиб, тс	10
Максимальная длина испытуемого образца, м	2,5

УНИКАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ

Для ряда испытаний специалистами ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ» разработаны собственные уникальные методики. В качестве примера можно привести исследование износостойкости полимерных материалов.

Первоначальная цель заключалась в оценке стойкости полимерного лайнера ГПАТ к износу под действием механических примесей, содержащихся в транспортируемой газовой среде при заданном давлении и скорости потока.

Для проведения соответствующих испытаний специалисты центра разработали испытательную установку (рис. 3) и алгоритм проведения испытаний:

1. Образец ГПАТ условным диаметром ДУ 100 длиной 10 м с металлическими фитингами фланцевого типа помещают на ложементы и фиксируют в положении с двумя изгибами на эксплуатационный радиус.

2. К образцу подключают арматуру для подачи газовой смеси с механическими примесями, проводят проверку на герметичность соединений путем опрессовки до рабочего давления. В качестве среды используют газ азот.

3. В емкость А засыпают кварцевый песок нужной фракции (в данном эксперименте 0,3…0,6 мм – зернистость песка определена исходя из требований ТЗ заказчика испытаний).

4. Газ под давлением 16 МПа подают из баллона 2. Он проходит через емкость А, захватывает абразивные частицы и переносит их по испытуемому образцу в емкость Б. Контроль давления осуществляется с помощью манометров 3, скорость – при помощи расходомеров 4. Число циклов подачи из одной емкости ограничено ее объемом; при переносе механических примесей из

Рис. 3. Технологическая схема установки для испытаний на износостойкость



Рис. 4. Испытания на разрушающее давление и визуально-измерительный контроль



Давление разрушения - 52,3 МПа (нормативное давление разрушения - не менее 48 МПа)

Вид поверхности лайнера ГПАТ после испытаний на износостойкость

одной емкости в другую, эксперимент продолжают через вторую емкость Б в обратном порядке.

5. Общее количество циклов определяется путем расчета переноса требуемого объема механических примесей через образец (в данном эксперименте выполнено 10 циклов).

После выполнения требуемого количества циклов переноса газовой смеси, образец демонтируют и производят осмотр. При отсутствии визуальных повреждений проводят испытание на разрушающее давление по ГОСТ 59834 (п. 9.5).

После проведения испытаний на разрушающее давление образец разрезают на сегменты и выполняют внутренний инспекционный контроль (ВИК) внутренней поверхности лайнера и соединений. Стойкость к износу определяют по значениям разрушающего давления (должно быть не ниже значений в исходном состоянии ГПАТ), а также по результатам ВИК толщины лайнера и качества внутренней поверхности (рис. 4).

Еще одна интересная методика была применена в процессе климатических испытаний ГПАТ. Предварительно замороженные образцы отогревали паром и горячей водой.

В ходе эксперимента три образца были заполнены водой на 50% объема. При дефростации была установлена следующая последовательность действий:

- образец БН-17.1 прогревался паром температурой +120°С;
- образец БН-18.1 прогревался паром температурой +100°С;
- образец БН-19.1 орошался водой температурой +80°С.

Процесс отогрева и внешний вид образцов после испытаний представлен на рис. 5.

Рис. 5. Отогрев паром предварительно замороженного образца ГПАТ



Процесс отогрева образца при температуре пара +120°С



Внешний вид образцов после воздействия паром

Рис. 6. Образцы для исследования химической стойкости термопластичных материалов (ПЭ-100 и PE-RT) производства ПАО «СИБУР Холдинг»

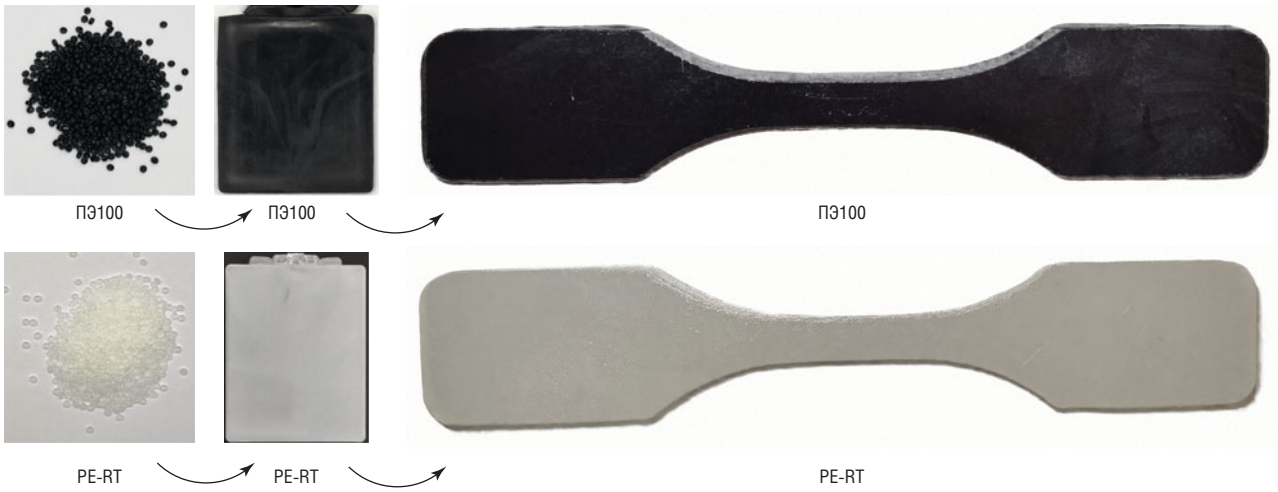


Таблица 3. Изменение массы образцов от исходного значения, %

Марка	Температура испытаний Т, °С	Модельная среда							
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
ПЭ-100 (СБ-1)	-20			0,83	0,12	1,71	0,65	0,77	0,03
	+20	0,00	0,07	7,58	0,32	6,64	6,73	5,52	0,15
	+60	0,00	0,04	11,82	0,40	9,12	9,93	10,05	0,14
	+80	0,00	0,10	16,50	0,49	13,2	14,70	15,11	-0,03
PE-RT MRS 8 (СБ-2)	-20			1,43	0,17	2,25	1,08	1,50	0,08
	+20	0,00	0,05	9,16	0,52	8,05	8,14	7,40	0,16
	+60	0,05	0,08	15,63	0,73	11,99	13,22	13,21	0,30
	+80	0,09	0,19	23,17	0,84	19,55	21,85	22,67	0,28

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В качестве примера научного исследования материалов ГПАТ, проведенного по заказу производителя трубной продукции, рассмотрим анализ химической стойкости термопластичных материалов ПЭ-100 и PE-RT, выполненный по заказу ПАО «СИБУР Холдинг».

Образцы материалов (рис. 6) выдерживались в восьми модельных средах, имитирующих агрессивные жидкости, транспортируемые по промысловым трубопроводам.

Испытания проводились в соответствии со следующими нормативными документами:

- ГОСТ 12423-2013 «Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)»;
- ГОСТ 12020-2018 «Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред»;
- ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение»;
- ISO 23936-1:2022. «Промышленность нефтяная и газовая, включая низкоуглеродную энергетику. Неметаллические материалы в контакте со средой, связанной с добычей нефти и газа. Часть 1. Термопласты».

В табл. 3 представлено изменение массы испытуемых образцов под действием модельных сред, в табл. 4 – результаты испытаний по определению проч-

Таблица 4. Прочность при растяжении образцов после выдержки в модельных средах, МПа

Марка	Предел прочности исходных образцов $\sigma_в$, МПа	Температура испытаний Т, °С	Модельная среда							
			№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
ПЭ-100 (СБ-1)	28,84	-20			27,46	29,10	25,17	28,84	29,59	27,55
	27,41	+20	30,19	26,46	22,7	26,09	24,23	23,60	23,86	29,31
	27,26	+60	28,28	27,83	23,21	26,19	25,45	22,16	22,76	28,81
	26,86	+80	28,67	27,21	21,15	30,07	21,53	22,42	22,85	30,57
PE-RT MRS 8 (СБ-2)	20,06	-20			19,14	20,30	18,91	20,38	19,29	20,50
	20,24	+20	21,43	19,20	17,20	16,96	17,58	17,08	16,85	21,22
	19,98	+60	21,64	19,66	15,97	18,61	17,11	16,81	14,99	20,79
	20,82	+80	20,64	20,45	16,32	21,25	16,45	17,54	18,30	21,03

ности при растяжении. Модельная среда №1 применялась только для испытаний при положительных температурах.

Состав модельных сред:

- №1: 30%-ный раствор соляной кислоты;
- №2: 50% вода дистиллированная, 25% NaCl, 25% $CaCl_2$;
- №3: 50% толуол, 50% о-ксилол (по ГОСТ Р 58346-2019);
- №4: 5% CO_2, 10% H_2S, 85% CH_4;
- №5: 70% гептан, 10% толуол, 20% циклогексан (среда по ISO 23936);
- №6: 20% петролейный эфир, 10% гексан, 10% октан, 10% декан, 10% ундекан, 10% додекан, 10% бензол, 10% толуол, 10% смесь ксилолов;
- №7: 10% гептан, 10% бензол, 20% толуол, 20% о-ксилол, 20% парафин, 20% церезин;
- №8: метанол.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В результате исследований установлено, что марка материала PE-RT с минимальной требуемой прочностью (MRS) 8 демонстрирует более выраженные изменения массы во всех исследованных модельных средах по сравнению с полиэтиленом высокой плотности ПЭ-100. Данное различие может быть обусловлено различиями в молекулярной структуре и степени кристалличности PE-RT.

Наиболее агрессивные среды, выдержка в которых изменяет массу материала PE-RT MRS 8 более чем на 20% – это модельные среды № 3, 5, 6, 7 при температуре 80°С. Изменение массы материала ПЭ-100 во всех модельных средах в температурном диапазоне от -20 до 80°С не превышало 20%. При выдержке во всех агрессивных средах исследуемые материалы не теряли массу, что свидетельствует об отсутствии растворения.

Минимальное значение коэффициента изменения прочности составило 0,8, тогда как в ГОСТ Р 59834 (Приложение А) заложен коэффициент запаса по среде, равный 1,25. Таким образом, фактическое максимально возможное уменьшение прочностных свойств лайнера ГПАТ уже учтено в конструктивном расчете для труб на 2-й класс эксплуатации «Нефть».

Практический смысл проведенных НИР заключается в следующем: полученная матрица изменения свойств полимерных материалов при их взаимодействии с агрессивной средой при различных температурах позволит производителям ГПАТ принимать более обоснованные решения при выборе материала для изготовления лайнера с учетом максимальной температуры транспортируемой среды.

ВЫДЕРЖКИ ИЗ ОБСУЖДЕНИЯ

Вопрос: *Анна Владимировна, является ли ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ» авторизованным испытательным центром в рамках единого оператора испытаний (ЕОИ)?*

Анна Федотова: Нет, на сегодняшний день ООО «НИЦ «НЕМЕТАЛЛ» не является самостоятельным авторизованным центром ЕОИ. Однако в 2025 году при выполнении работ по нефтеналивным рукавам наше подразделение прошло аудит и аккредитацию в ЕОИ через партнера – ООО «ИТ-Сервис». В настоящее время у нас есть планы по прохождению самостоятельной аккредитации.

Вопрос: *Уточните, пожалуйста по универсальному стенду растяжения/сжатия.* Насколько мне известно, модуль упругости и коэффициент Пуассона не определяются для изделия (а ПАТ – это «изделие»). По стандартам, эти показатели только для материалов…

А.Ф.: Нет, Вы не правы. Для выполнения прочностных расчетов по ГОСТ Р 70623-2023 и ГОСТ Р 70624-2023 требуются модуль упругости и коэффициент Пуассона именно конструкции ПАТ целиком, поэтому мы и выполняем такие испытания и создали уникальный стенд для этого.

Вопрос: *В нашем регионе остро стоит проблема лесных пожаров. Проводятся ли в центре испытания на огнестойкость ГПАТ и распространяются ли они только на верхний слой трубы или возможен контроль внутреннего слоя?*

А.Ф.: На данный момент мы проводили испытания только с внешним слоем. Однако лаборатория располагает необходимым оборудованием, и если возникнет потребность в оценке огнестойкости внутреннего слоя, мы готовы разработать соответствующую методику. У нас молодой инициативный коллектив, способный решать нестандартные задачи.

Вопрос: *Расскажите, пожалуйста, об экспериментах по определению газопроницаемости. Проводились ли исследования на целой трубе?*

А.Ф.: В 2021-2022 годах мы разработали установку для измерения газопроницаемости образцов, вырезанных из внутреннего лайнера ГПАТ.

Методика заключалась в следующем: из трубы фрезерованием изготавливали диски, которые помещали в двухкамерную ячейку. С одной стороны, подавался газ, с другой – создавался вакуум, и через пробоотборник выполнялся хроматографический контроль.

После получения статистически значимых результатов на образцах мы перешли к исследованиям на целой трубе. В настоящее время проводятся эксперименты с трубами связной и несвязной конструкции. Для несвязной конструкции контроль газа в межтрубном пространстве осуществляется через газоотводные штуцеры фитинга. Вакуумный шланг подключается непосредственно к газоотводному штуцеру, и создание вакуума производится прямо в межслойном пространстве.

В ближайшее время нам предстоит систематизировать и проанализировать полученную информацию.

Вопрос: *Какой газ вы использовали в экспериментах?*

А.Ф.: В данном случае – метан.

Вопрос: *Рассматривается ли использование многокомпонентной смеси, близкой по составу к природному газу?*

А.Ф.: В лаборатории имеется смесь «метан – CO_2 – H_2S», однако в описанных экспериментах (по заказу ПАО «НОВАТЭК») она не применялась, так как заказчика интересовала чистая метановая среда.

Вопрос: *Кто был заказчиком? «СИБУР» или «НОВАТЭК»?*

А.Ф.: «НОВАТЭК» – инициатор работ, «СИБУР» – финансирование.