

**Реализация автоматизированной методики
определения физико-механических характеристик
материалов на примере труб с ППУ-ОЦМ изоляцией
и оболочки ПИ-труб**

***The implementation of an automated method
of determination of physical and mechanical properties
of pipe materials with polyurethane insulation
and sheath of polyethylene***

МОЖАРОВСКИЙ В.В., КУЗЬМЕНКОВ Д.С., ШИЛЬКО С.В.
Mazharovsky V.V., Kuzmenkov D.S., Shilko S.V.

Показана реализация автоматизированной методики исследования, определения физико-механических свойств материалов труб с ППУ-ОЦМ изоляцией и оболочки ПИ-труб на основе разработанного алгоритма и созданной компьютерной программы, сделан расчет и показано хранение различных характеристик стальных труб ППУ. Проведены экспериментальные исследования.

Ключевые слова: автоматизированная методика, свойства материалов, трубы с изоляцией.

The article shows the implementation of an automated method of investigation, determination of physical and mechanical properties of pipe materials with polyurethane insulation and sheath of polyethylene-on the basis of developed algorithm and created computer program. It has been calculated out and the storage of various pipe characteristics is shown. Experimental studies have been carried out.

Key words: an automated method, properties of materials, pipe with insulation.

Введение

Борьба с коррозией и потерей тепла в трубопроводах теплосети успешно решается с помощью применением стальных труб с теплоизоляцией в виде изолирующего слоя из жесткого пенополиуретана (ППУ) в спиральновитой герметичной оболочке из тонколистовой оцинкованной стали (далее – трубы с ППУ-ОЦМ изоляцией для наземной прокладки трубопроводов) и внешней гидрозащитной полиэтиленовой оболочки (ПИ-трубы) для подземной безканальной прокладки [1], [2]. Труба ППУ является достаточно прочной конструкцией благодаря хорошей адгезии между стальной трубой, изолиру-

щим слоем из ППУ, а также связи между пенопластом ППУ и внешней гидрозащитной полиэтиленовой оболочкой. Для изготовления полиэтиленовой оболочки используется термостойкостабилизированный полиэтилен низкого давления высокой плотности черного цвета марки 273-79 высшего и первого сорта. Показатели основных свойств тепловой изоляции труб с ППУ-ПЭ изоляцией должны соответствовать ГОСТ 3073. Требования к трубопроводам с оцинкованной оболочкой изложены в ГОСТ 30732-2006 "Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитным покрытием". Проведение проектными организациями расчетов и экспериментов согласно ГОСТ для таких стальных труб представляет довольно сложную задачу, поэтому возникает необходимость разработки программного комплекса, позволяющего автоматизировать данный процесс для оболочки ПИ-труб и труб с ППУ-ОЦМ изоляцией [2]. Используя разработанную программу [6], покажем реализацию автоматизированной методики определения физико-механических характеристик материалов на примере труб с ППУ-ОЦМ изоляцией и оболочки пп-труб.

Автоматизированная методика и анализ результатов определения физико-механических свойств материалов труб с ППУ-ОЦМ изоляцией

Результаты испытания на сжатие полиуретановой (ППУ) изоляции

Пенополиуретан используется в качестве теплоизоляционного материала для трубопроводов по ГОСТ 30732-2006. Автоматизированная методика расчета прочности пенополиуретановой оболочки выполнялась согласно ГОСТ на указанный материал.

Для аттестации деформационных свойств теплоизоляционного материала на машине Инстрон 5567 (см. рис. 4) были проведены механические испытания на статическое сжатие. Образцы, вырезанные из натурального изделия, шлифовались до получения призматической формы с параллельными гранями, что обеспечивало прилегание к опорным плитам машины. Нагружение осуществлялось до появления видимых следов разрушения в виде трещин (для данных материалов разрушение развивалось при относительной деформации сжатия свыше 50 %). На рисунке 2 показана усредненная зависимость, построенная с относительной погрешностью, не превышающей 6 %.

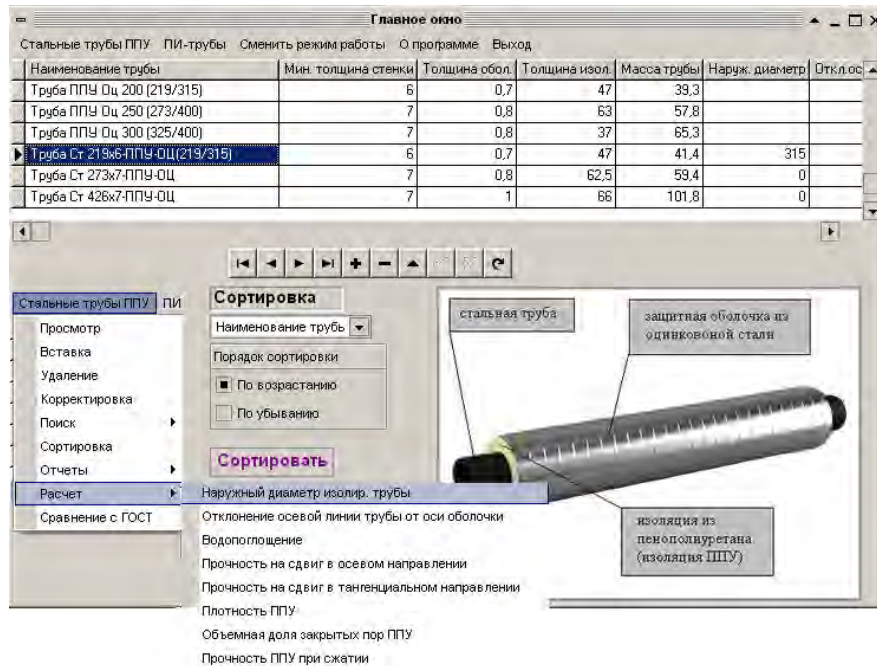


Рис. 1. Схема автоматизированной методики расчета прочности ППУ-изоляционного слоя



Рис. 2. Усредненная зависимость «усилие (Н)- перемещение (мм), построенной по 3-м диаграммам

Были также построены зависимости «напряжение – деформация», представленные на рисунке 3. Видно, что указанные зависимости линейны до деформации 5%, далее имеет место примерно постоянное значение условного напряжения (горизонтальный участок) до деформации 25-30 %. Затем происходит ужесточение материала, обусловленное смятием и закрытием пор, что проявляется в нелинейном возрастании сжимающего напряжения.

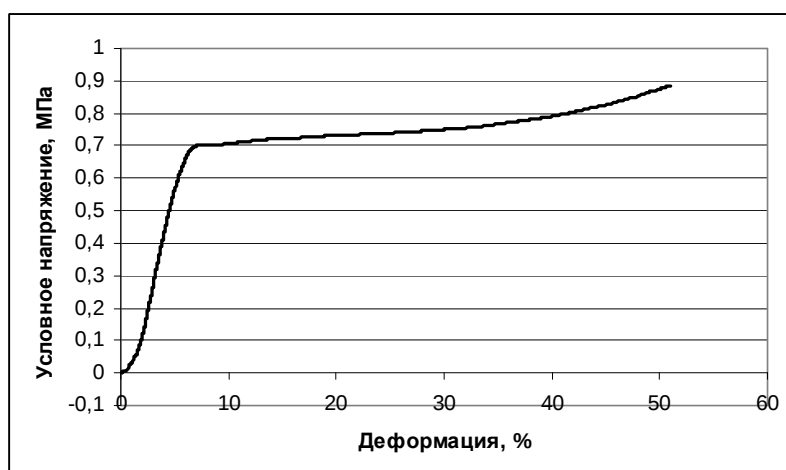
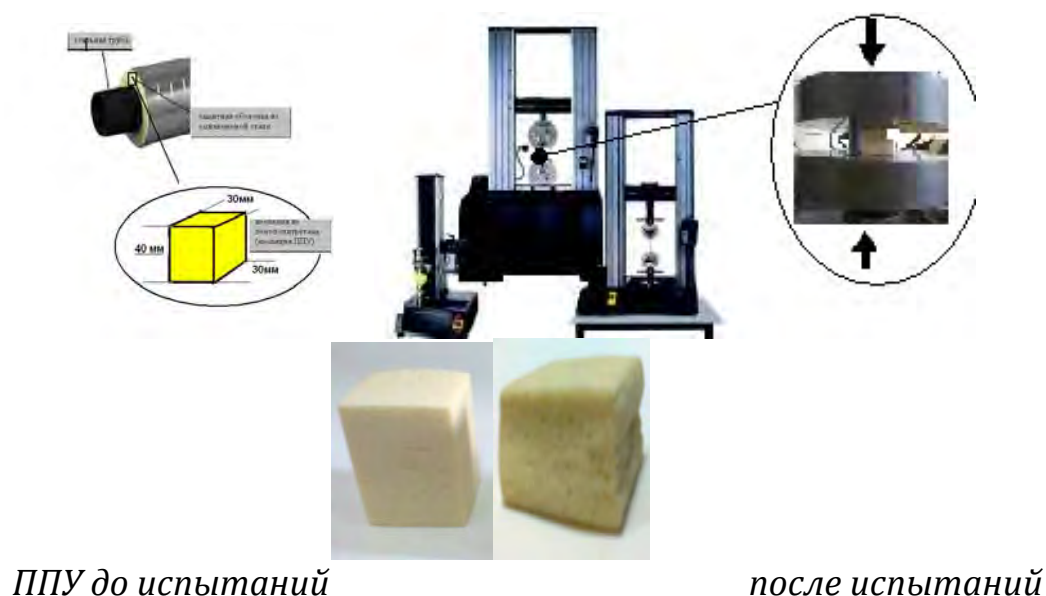


Рис. 3. Усредненная зависимость «условное напряжение (МПа) – деформация (%)» при сжатии теплоизолирующего материала

После снятия нагрузки наблюдается лишь частичное восстановление формы образцов, что вызвано накоплением остаточных деформаций ползучести и пластичности теплоизолирующего материала.

На основании экспериментальных результатов была реализована автоматизированная методика расчета на прочность образцов с ППУ изоляций (см. рис. 5).



ППУ до испытаний

после испытаний

Рис. 4. Подготовка и установка образцов на машине INSTRON 5567 для статических испытаний материалов на растяжение, сжатие, изгиб

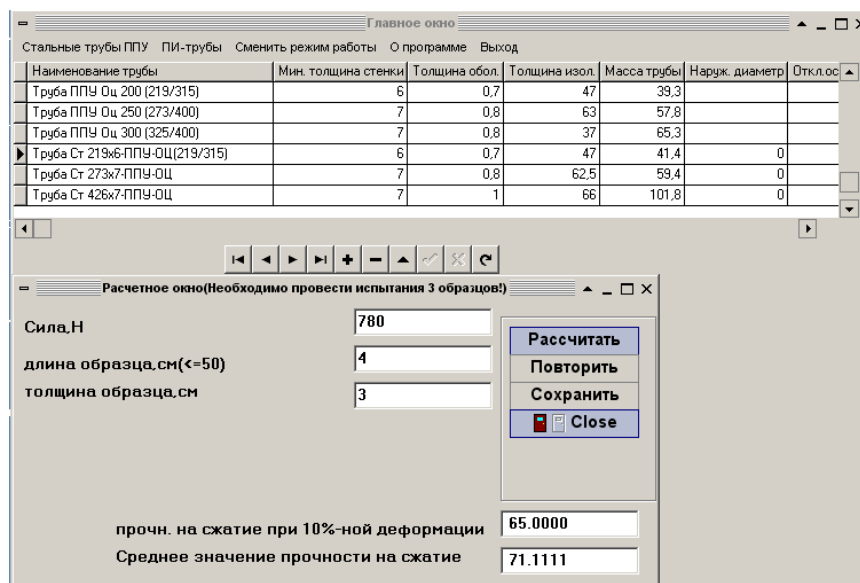


Рис. 5. Результаты расчета по автоматизированной методике анализа прочности при сжатии ППУ

Результаты определения водопоглощения теплоизоляционного материала

Испытания на водопоглощение проводились в соответствии с ГОСТ 30732-2006. Образцы призматической формы получали вырезанием из теплоизоляционного материала с последующим шлифованием на наждачной бумаге для получения плоскопараллельных поверхностей граней. Массу образца определяли на 5-и образцах взвешиванием с точностью до 0,01 г, объем образца определяли с точностью до 0,1 см³ (см. табл. 1, рис. 6). Образец выдерживали в течение 90 мин в кипящей дистиллированной воде, а затем в воде с температурой 20°C в течение 60 мин. После истечения указанного времени с образца фильтровальной бумагой удаляли капли воды и определяли массу m_1 с точностью до 0,01 г. Водопоглощение W , % определяли по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m_0}{V_0 \rho} \cdot 100\%,$$

где ρ – плотность воды, г/см³;

m_0 – первоначальная масса образца;

m_1 – масса образца после выдерживания в кипящей воде;

V_0 – объем образца, см³.

Таблица 1. Экспериментальные данные для определения водопоглощения материала

№ п/п	Масса образца		Объем образца, см ³	Водопоглощение, %
	до испытания, г	после испытания, г		
1	3,14	4,14	36,0	2,78
2	3,12	3,98	36,0	2,39
3	2,76	3,68	33,6	2,74
4	3,22	4,34	36,0	3,11
5	2,94	3,86	33,6	2,74

За результат измерения принимали среднеарифметическое значение водопоглощения, которое составило 2,72 %.

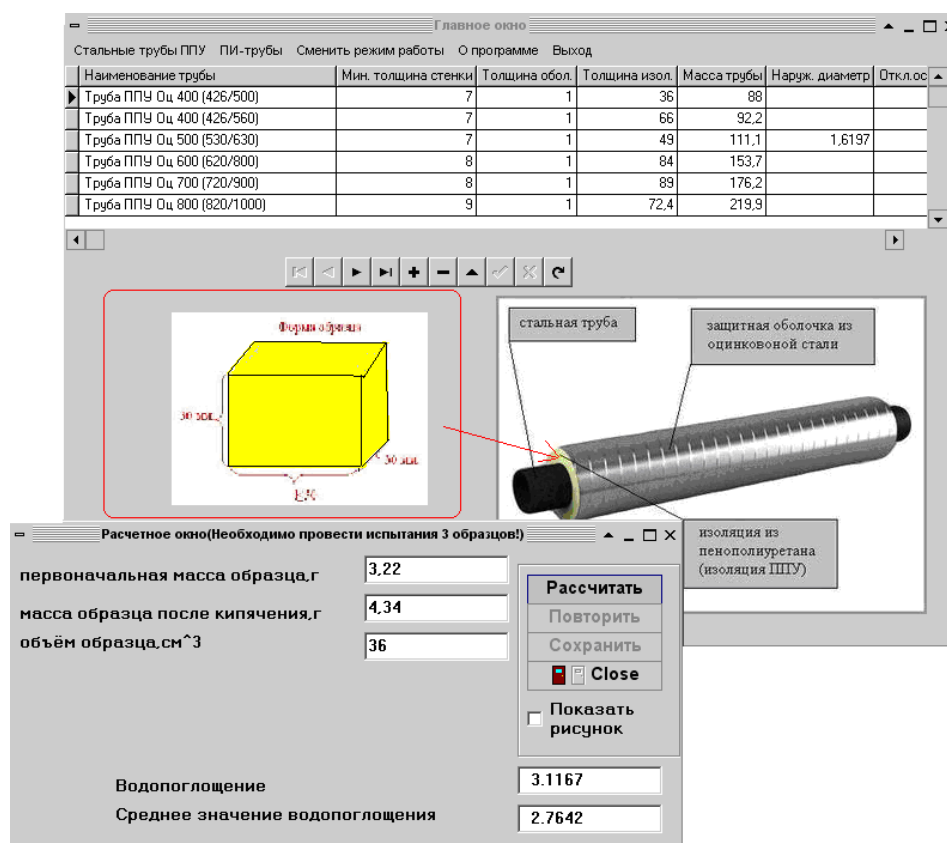


Рис. 6. Схема автоматизированной методики расчета водопоглощения ППУ

Определение адгезионной прочности соединения теплоизолирующего материала с металлической трубой.

В соответствии с условиями испытаний на сдвиг, по нормали к торцевой поверхности теплоизоляции при помощи приспособления прикладывалась статическая нагрузка до наступления сдвига теплоизоляции относительно стальной трубы. Как показали опыты, разрушение имело преимущественно адгезионный характер, т.е. происходило по границе между теплоизоляцией и металлической трубой с незначительными локальными объемными вырывами теплоизолирующего материала.

Было определено максимальное сдвигающее усилие $N = 44297$ Н. Исходя из площади контакта теплоизоляции с металлической трубой $S = \pi dh$, где d – диаметр трубы, h – длина контакта с теплоизоляцией по оси трубы, получено значение площади $S = 1554,3$ см². Таким образом, адгезионная прочность при сдвиге соединения «теплоизоляция – стальная труба» составила $N/S = 28,5$ Н/см² = 0,285 МПа. На рисунке 7 представлена методика автоматизированного расчета прочности трубы на сдвиг в осевом направлении.

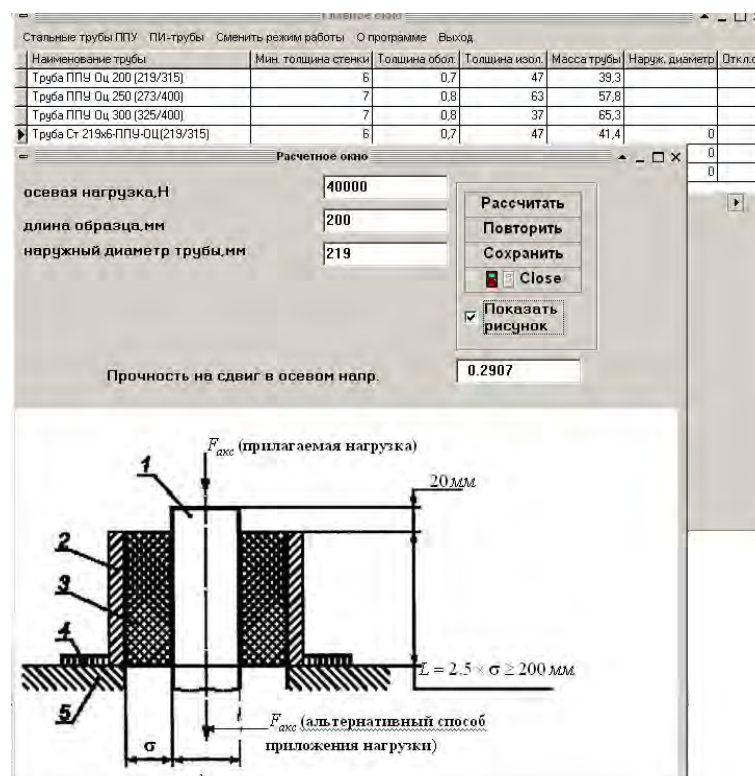


Рис. 7. Схема экспериментального исследования и результаты вычисления прочности на сдвиг

Автоматизированная методика и анализ результатов определения физико-механических свойств материалов ПИ-труб

В качестве объекта испытаний использовалась металлическая труба Ст 219х6 1-ППУ-ПЭ ГОСТ 30732-2006 (см. рис. 8). Для определения адгезионной прочности крепления оболочки с ППУ труба разрезалась на фрагменты (см. рис. 9).



Рис. 8. Образец трубы для испытания на сдвиг

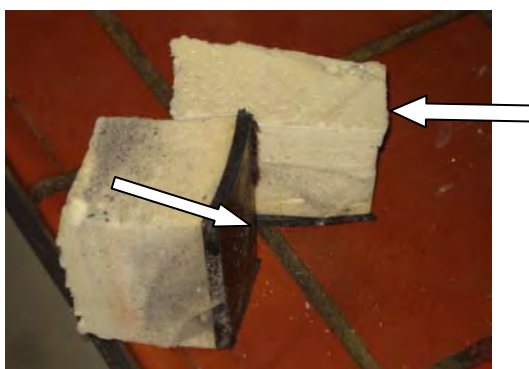


Рис. 9. Вид фрагментов теплоизолирующего материала после испытания на сдвиг. Поверхности разрушения указаны стрелками

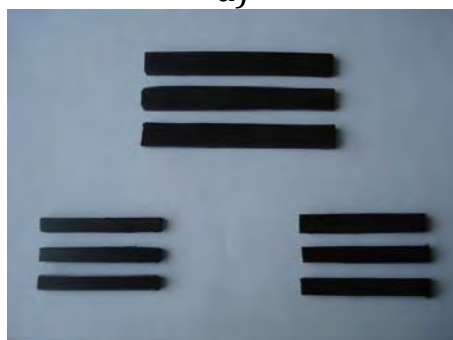
Испытания на растяжение материала оболочки

Из полиэтиленовой оболочки ПИ-трубы вырезали и шлифовали до придания призматической формы 9 образцов в виде полосок. Для оценки масштабного фактора были изготовлены образцы 3-х типов-размеров (рис. 10).

Предварительно образцы кондиционировались при температуре $20 \pm 2^\circ \text{C}$ по ГОСТ 12423-66. Способ закрепления образцов на машине Инстрон 5567 показан на рисунке 11.



а)



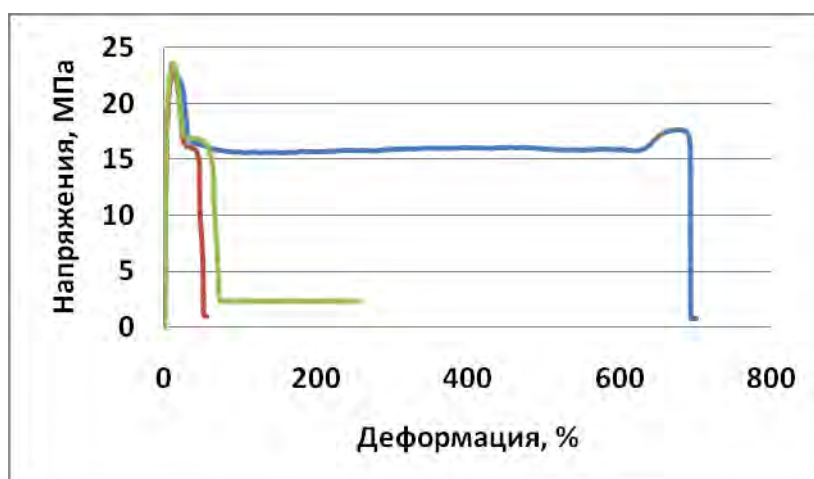
б)

Рис. 10. Образцы для проведения механических испытаний, изготовленные из полиэтиленовой трубы-оболочки:
а) большие образцы; б) образцы 3-х различных типоразмеров

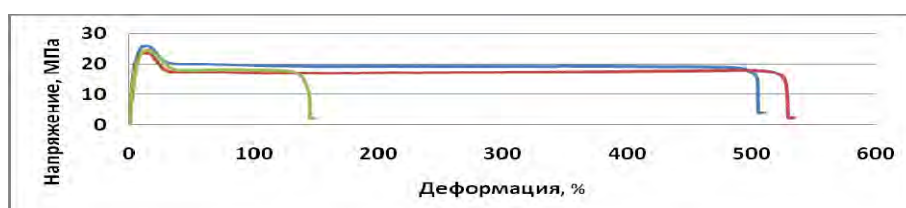


Рис. 11. Испытание на растяжение образцов из оболочки ПИ-трубы

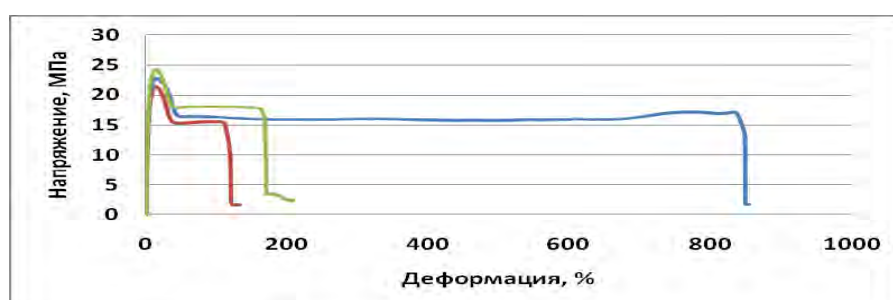
В результате испытания образцов на растяжение со скоростью 20 мм/мин были получены диаграммы деформирования, показанные на рисунке 12. Вид образцов после испытания показан на рисунке 13. Относительное удлинение и предел текучести при разрыве определялись по ГОСТ 11262-80.



а)



б)



в)

Рис. 12. Зависимости напряжения от деформации материала оболочки, полученные на образцах 3-х типоразмеров: а) большие образцы; б) средние образцы, в) малые образцы

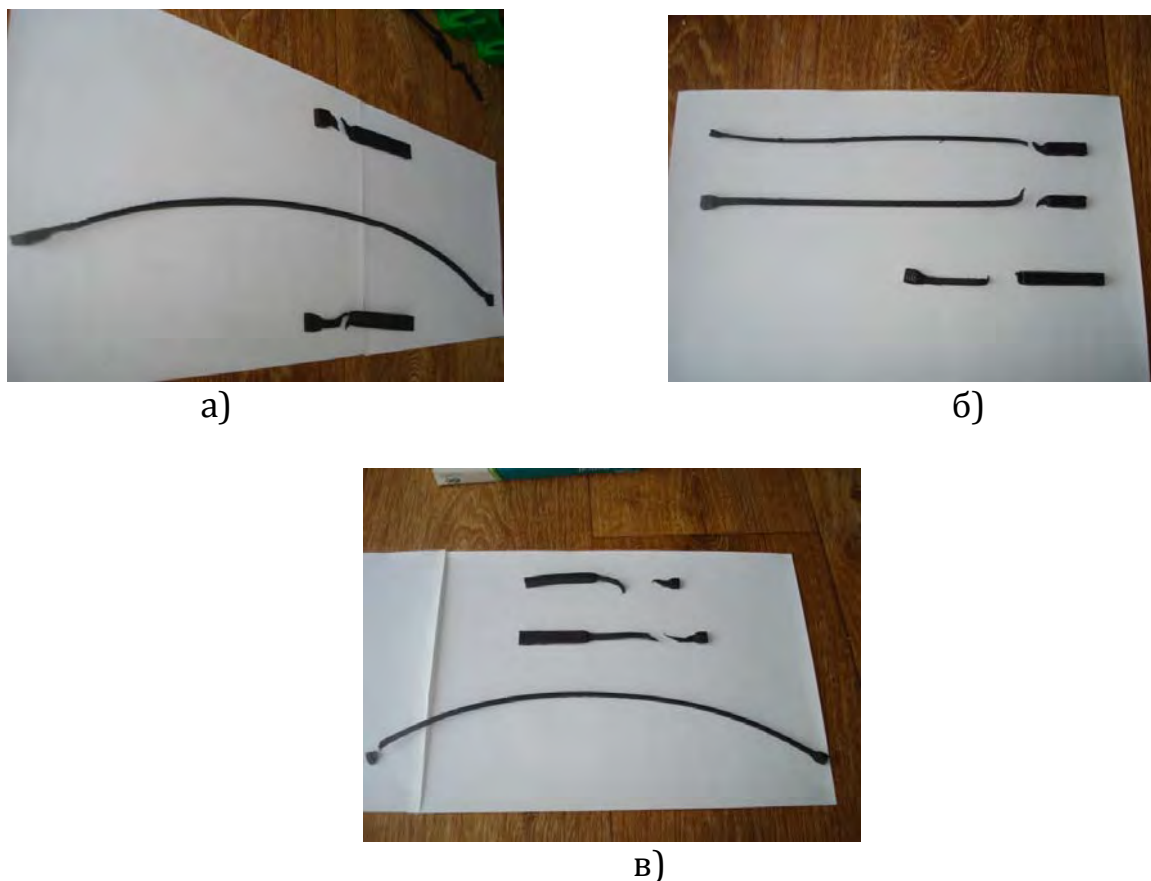


Рис. 13. Вид образцов полиэтиленовой трубы-оболочки после испытания на растяжение: а) большие образцы (№№1-3), б) средние образцы (№№4-6), в) малые образцы (№№7-9)

В результате обработки диаграмм растяжения были получены деформационно-прочностные характеристики материала оболочки, приведенные в таблице. Видно, что значения напряжения текучести и соответствующей деформации являются достаточно стабильными. Максимальное удлинение при разрыве имеет значительный разброс (см. выделенные низкие значения удлинения в таблице 2), что, вероятно, связано с наличием микродефектов материала, проявляющихся после образования шейки в процессе растяжения. Более высокие значения указанного параметра показали испытания образцов среднего размера (№№ 4-6 таблицы). Тем не менее, среднее значение максимальной деформации при разрыве является достаточно высоким (377,5 %). На рисунке 14 представлена методика автоматизированного расчета предела текучести материала трубы.

Таблица 2. Механические характеристики материала оболочки при растяжении

№ образца	Деформация, начала текучести, %	Напряжение пластического течения, МПа	Максимальное удлинение при разрыве, мм	Максимальная деформация при разрыве, %
1	12,4	22,8	491,2	701
2	11,7	22,6	39,0	55
3	11,2	23,5	179,7	256
4	13,1	26,0	188,7	509
5	12,6	23,8	197,5	533
6	14,0	24,6	55,2	149
7	14,9	22,8	316,2	854
8	14,0	24,3	77,2	208
9	14,0	21,5	49,3	133
Среднее значение	13,1	23,5	177,1	377,5

Определение плотности материала оболочки ПИ-трубы

Определение плотности проводилось по ГОСТ 15139-86 Пластмассы. Метод определения плотности (объемной массы) методом гидростатического взвешивания. Для определения плотности из оболочки и муфты были изготовлены образцы в форме параллелепипедов. Плотность методом гидростатического взвешивания определяется по автоматизированной методике (см. рис. 15).

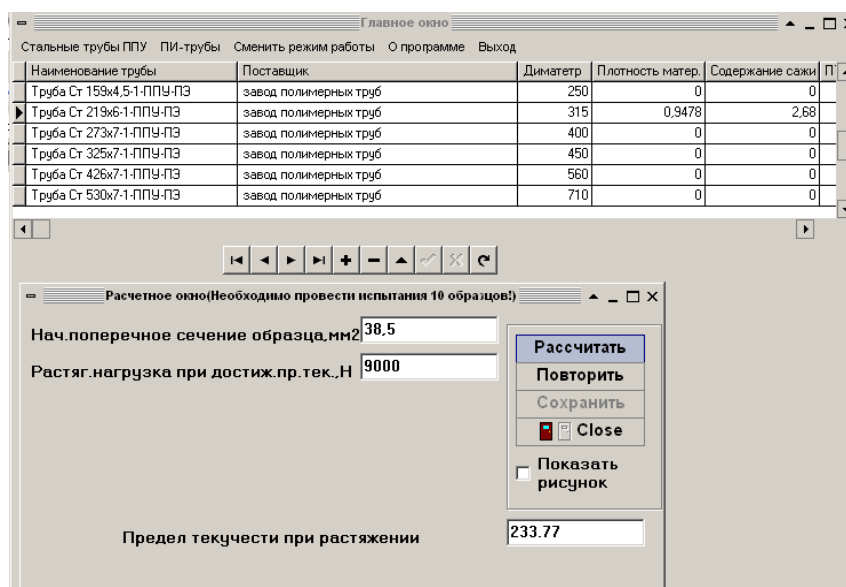


Рис. 14. Вычисление предела текучести материала при растяжении

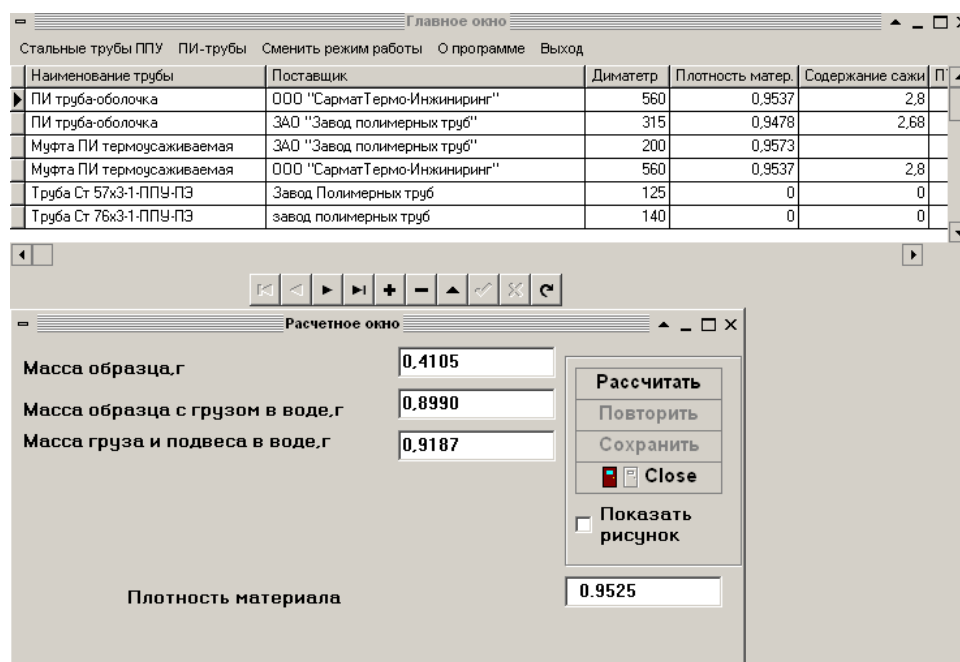


Рис. 15. Определение плотности материала полиэтиленовой оболочки

Определение процентного содержания сажи в материале оболочки ПИ-трубы

Определение процентного содержания сажи проводилось по ГОСТ 26311-84 Полиолефины. Результаты получаются по построенной автоматизированной методике. Ниже показан пример расчета (см. рис. 16).

Для проведения испытаний из материала оболочки ПИ-трубы были изготовлены образцы.

Таблица 3. Определение процентного содержания сажи

№	Масса навески материала до отжига, г	Масса остатка после отжига, г	Содержание сажи, %
1	0,500	0,0115	2,3
2	0,500	0,0145	2,9

Процентное содержание сажи определяется по формуле (1):

$$\eta = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m_1 – масса навески;
 m_2 – масса остатка.

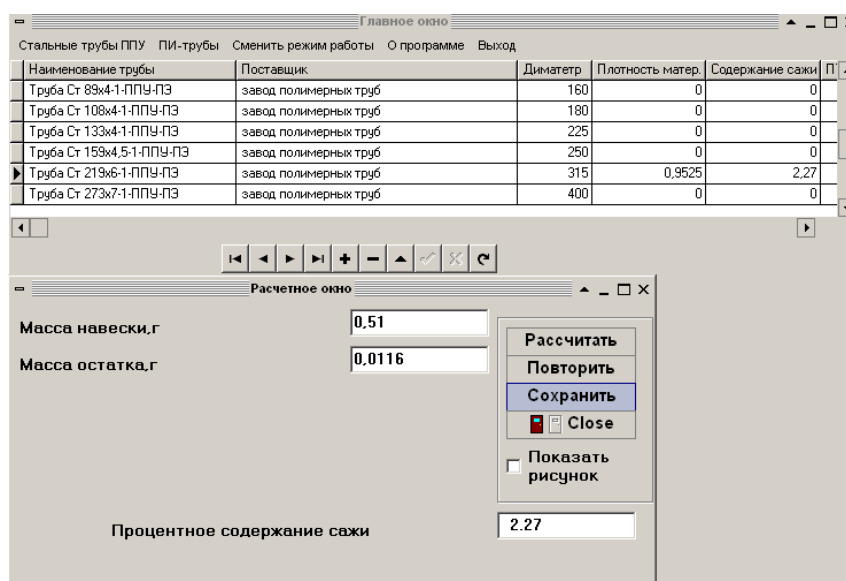


Рис. 16. Методика определения процентного содержания сажи в материале оболочки

Таким образом, содержание сажи в материале полиэтиленовой трубы составляет 2,3 %, что соответствует пункту 4.1.4.1 СТБ 1295-2001.

Заключение

В результате выполненной работы разработана автоматизированная методика для определения и анализа физико-механических свойств материалов труб с ППУ - изоляцией и оболочки ПИ-труб; показана возможность автоматизированной обработки результатов специально проведенных экспериментов испытываемых материалов по ГОСТ, при этом разработанный алгоритм дополнительно включает результаты испытания полиэтиленовой и оцинкованной трубы-оболочки и другие свойства, которые характеризуют работу системы.

Разработанный подход легко можно применить на другие трубопроводные системы, использующие новые композиционные материалы.

Литература

1. СНП 41-105-2002 Проектирование и строительство тепловых сетей бесканальной прокладки из стальных труб с промышленной теплоизоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://tgsv.ucoz.ru/load/normativy/sp_41_105_2002_proektirovanie_teplovykh_setej_beskanalnoj_prokladki_iz_stalnykh_trub_s_ppu_izoljaciej/ 3-1-0-4 16. -Дата доступа: 03.11.2011.

2. Batallas, M. Determining the performance of polyurethane foam pipe insulation for high temperature service / M. Batallas, H. Yih, P. Singh //Northern area western conference Calgary, Alberta. February 6 – 9, 2006. – Calgary, 2006. - P. 1–18.
3. Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрических труб с учетом неоднородности материала / В.В. Можаровский [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2009. – № 1. – С. 77–82.
4. Программный комплекс контроля и диагностики сосудов и трубопроводов / В.В. Можаровский [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль – 2002. – № 1. – С. 28–31.
5. Концепція автоматизації процесу контролю технологічного стану промислових трубопровідних систем, посудин і резервуарів /В.В. Можаровський [і др.] // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Інформаційні системи і мережі». – 2011. – № 699. – С. 175–184.
6. Можаровский, В.В. Автоматизированная методика определения физико-механических характеристик материалов для труб с ппу-оцм изоляцией/ В.В. Можаровский, Д.С. Кузьменков, С.В. Шилько // Вісник Чернігівського державного університету. Сер. техн. наук. – 2012г.–№3 – С.42-47.

Статья поступила в редакцию 03.06.14