
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_66

УДК 53.083.92

Н. В. Герасименко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ И ДИНАМИКИ УВЛАЖНЕНИЯ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

N. V. Gerasimenko

RESEARCH ON WATER ABSORPTION AND MOISTURE DYNAMICS IN POLYURETHANE FOAM INSULATION OF HEAT NETWORKS PIPELINES

Аннотация

Представлены результаты исследований водопоглощения, коэффициентов диффузии и динамики увлажнения теплоизоляционного слоя из жесткого пенополиуретана. Оценка скорости диффузии влаги дана на основе математической модели, представленной одномерным уравнением диффузии.

Полученные результаты могут быть использованы при исследованиях и моделировании процессов, связанных с диагностикой трубопроводов тепловых сетей методами рефлектометрии и пороговыми детекторами сопротивления.

Ключевые слова:

ППУ-изоляция, влажность, водопоглощение, дистанционный контроль, тепловые сети.

Для цитирования:

Герасименко, Н. В. Исследование водопоглощения и динамики увлажнения пенополиуретановой изоляции трубопроводов тепловых сетей / Н. В. Герасименко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 66–74.

Abstract

The paper presents results of the research on water absorption, diffusion coefficients and moisture dynamics in a heat-insulating layer made of rigid polyurethane foam. The moisture diffusion rate is estimated based on a mathematical model represented by the one-dimensional diffusion equation.

The results obtained can be used in research and modeling of processes of diagnosing heat networks pipelines by applying reflectometry methods and threshold detectors of resistance.

Keywords:

PUF insulation, humidity, water absorption, remote control, heating networks.

For citation:

Gerasimenko, N. V. Research on water absorption and moisture dynamics in polyurethane foam insulation of heat networks pipelines / N. V. Gerasimenko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 66–74.

Введение

Жесткие пенополиуретаны (ППУ) получают в промышленности путем химической реакции компонента А, представляющего собой смесь простых полиэфиров, вспенивающих химических добавок и компонента Б – полимерного дефинилметандиизоцианата.

Химическая реакция указанных компонентов протекает с выделением теплоты и активным выделением вспенивающего газа. В результате образуется мелкодисперсная эмульсия, происходит нарастание вязкости, повышается температура смеси. Постепенное отвердевание пенополиуретановой смеси приводит к образованию трехмерной полимерной структуры. Плотность и, как следствие, пористость получаемого пенополиуретанового состава зависят от типа используемых компонентов [1].

В работе рассматриваются пенополиуретаны, получаемые в процессе реакции компонентов Изолан А350 (или А350ф для фасонных изделий) и Vorapate М229, а также Эластопор Н2130 и IsoPMDI 92140. Целью исследования является получение информации о динамике увлажнения слоя ППУ-изоляции при наличии дефектов основной трубы. Эти сведения необходимы для теоретических и экспериментальных исследований режимов работы системы оперативного дистанционного контроля.

Исследования кажущейся плотности и водопоглощения ППУ

Исследование свойств начнем с получения образцов ППУ-изоляции и оценки кажущейся плотности материала.

Кажущаяся плотность образцов ППУ – масса единицы объема материала, включая объем закрытых пор. Для исследования кажущейся плотности изоляционного материала из ППУ согласно ГОСТ 409–2017 [2], получаемого в ходе реакции компонентов А и Б,

был выполнен отбор образцов следующим образом. Образцы кубической формы с размерами сторон $25 \times 25 \times 25$ мм, измеренными с точностью до ± 1 мм, вырезаны на расстоянии 100 мм от края теплоизоляционного слоя сериями по два экземпляра. Всего для экспериментов отобрано по 10 образцов на каждый тип изделия. В качестве исследуемых изделий были выбраны трубы различного диаметра и фасонные изделия – тройники и отводы.

Расчет плотности по результатам взвешивания образцов на лабораторных весах «Госметр» проводился согласно ГОСТ 24104–2001 [3]. Кажущаяся плотность образцов ППУ с известной массой M_o и объемом V_o рассчитывалась по формуле $\rho = M_o/V_o$. Условия кондиционирования в помещении, где проводился эксперимент: температура воздуха 24 °С, влажность воздуха 51 %. Результаты исследования плотности представлены в табл. 1.

Для дальнейшего анализа свойств ППУ при наличии увлажнения определим величину, позволяющую характеризовать влажностное состояние ППУ. Для описания влажностного состояния теплоизоляционных материалов трубопроводов используют [4] безразмерную величину – влагосодержание по массе W_m , %, представляющую собой отношение разности масс увлажненного и сухого образцов, отнесенную к массе сухого образца. Произведение влагосодержания на плотность вещества ρ , из которого изготовлен теплоизоляционный материал, позволяет рассчитать объемное влагосодержание $W_v = W - m\rho$.

Изучение механизма влагопереноса в ППУ-изоляции начнем с исследования водопоглощения отобранных образцов и получим зависимость данной величины от кажущейся плотности ППУ. Наличие экспериментальных данных о водопоглощении позволит выпол-

нить оценку коэффициента диффузии влаги D , необходимого для дальнейшего построения математической

модели процесса диффузии влаги в слое ППУ.

Табл. 1. Кажущаяся плотность образцов ППУ изоляции

Номер опыта	Труба ¹ , кг/м ³	Труба ² , кг/м ³	Тройник ³ , кг/м ³	Отвод ³ , кг/м ³
1	82,58	64,47	71,25	69,85
2	91,34	61,51	68,61	71,01
3	64,77	63,28	68,77	71,10
4	93,46	69,71	87,15	71,10
5	88,19	62,34	80,55	78,32
6	81,71	79,71	82,29	67,18
7	86,58	81,22	74,67	69,21
8	61,43	64,54	72,73	72,23
9	72,69	66,32	68,72	71,18
10	73,62	68,65	80,31	71,10

¹Компонент А – Изолан А350; компонент Б – Voranate M229.
²Компонент А – Эластопор Н2130; компонент Б – IsoPMDI 92140.
³Компонент А – Изолан А350ф; компонент Б – Voranate M229.

Согласно ГОСТ 4650–2015 [5], испытание на водопоглощение может быть выполнено двумя методами: погружением в воду комнатной температуры (≈ 23 °С) или погружением в кипящую воду. В обоих случаях образцы подвергаются предварительной сушке при температуре ($50,0 \pm 2$) °С в специализированном сушильном шкафу.

Воспользуемся методом погружения в кипящую воду, который заключается в следующем. Предварительно высушенные образцы ППУ помещают в стальную корзину с зажимами, предотвращающими всплытие образцов (рис. 1). Корзину опускают в кипящую дистиллированную воду на (30 ± 5) мин, затем образцы извлекают для контрольного взвешивания, после чего снова погружают в кипящую воду на такой же промежуток времени и снова взвешивают. Процедура и технические средства для взвешивания образцов аналогичны используемым в ходе исследо-

вания плотности образцов ППУ. Для каждого испытуемого образца рассчитывается массовая доля поглощенной воды (водопоглощение по массе, W_m , %) по формуле

$$W_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \%,$$

где m_2 – масса образца после выдержки в кипящей воде; m_1 – изначальная масса образца после высушивания.

Испытания по изложенной методике выполнены для двух наборов образцов, каждый из которых получен в процессе реакции вышеописанных компонентов [6]. Условия кондиционирования в помещении при проведении эксперимента: температура воздуха 23,7 °С; влажность воздуха 50 %. Результаты эксперимента представлены на рис. 2 и 3.

Анализ полученных зависимостей

показывает, что с увеличением плотности ППУ водопоглощение снижается, что обусловлено уменьшением размера ячеек (пор), а также увеличением ко-

личества закрытых ячеек, что препятствует проникновению влаги внутрь материала.

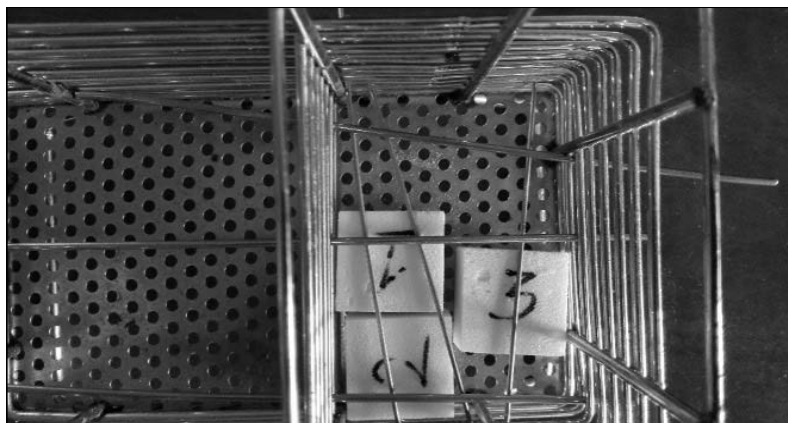


Рис. 1. Образцы ППУ для экспериментального исследования водопоглощения

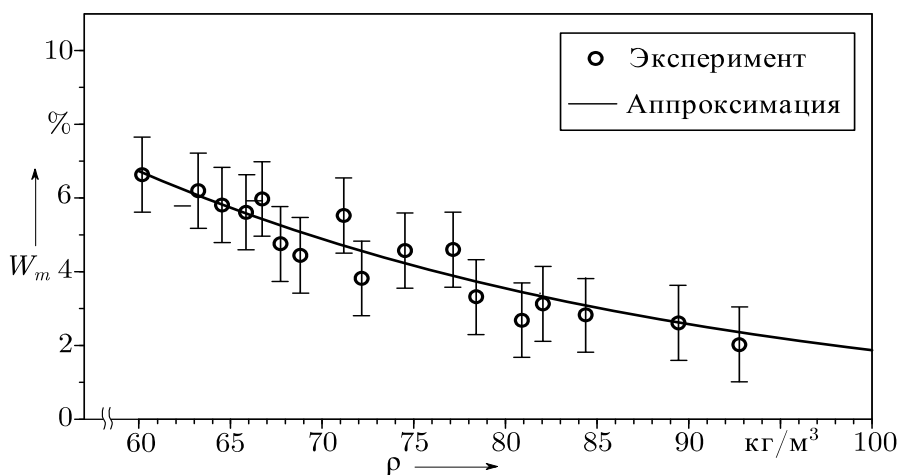


Рис. 2. Водопоглощение ППУ-изоляции на основе компонентов Изолан А350(ф) и Voranate M225

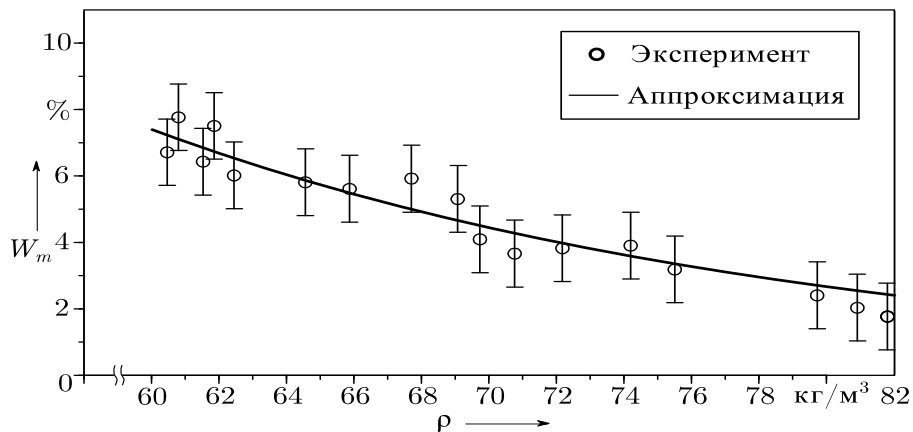


Рис. 3. Водопоглощение ППУ-изоляции на основе компонентов Эластопор H2130 и IsoPMDI 92140

Оценка коэффициентов диффузии влаги

Выполним оценку коэффициента диффузии влаги. Непосредственное экспериментальное исследование коэффициента диффузии дает более точный результат, чем оценка, полученная на основе имеющихся данных о водопоглощении, однако такие эксперименты требуют продолжительных наблюдений и сложных экспериментальных установок [7–9].

Согласно [5], для оценки коэффициента диффузии можно использо-

вать приближенную формулу

$$\sqrt{D} \approx \frac{1}{W_s} \cdot \frac{d}{0,52\pi} \cdot \frac{W_m}{\sqrt{t}}, \quad (1)$$

где d – толщина испытуемого образца; W_s – водопоглощение насыщения, $W_s = 7\%$; t – продолжительность испытания на водопоглощение, $t = 1,5$ ч.

Используя формулу (1), получим зависимости коэффициентов диффузии от плотности ППУ для двух наборов образцов (рис. 4).

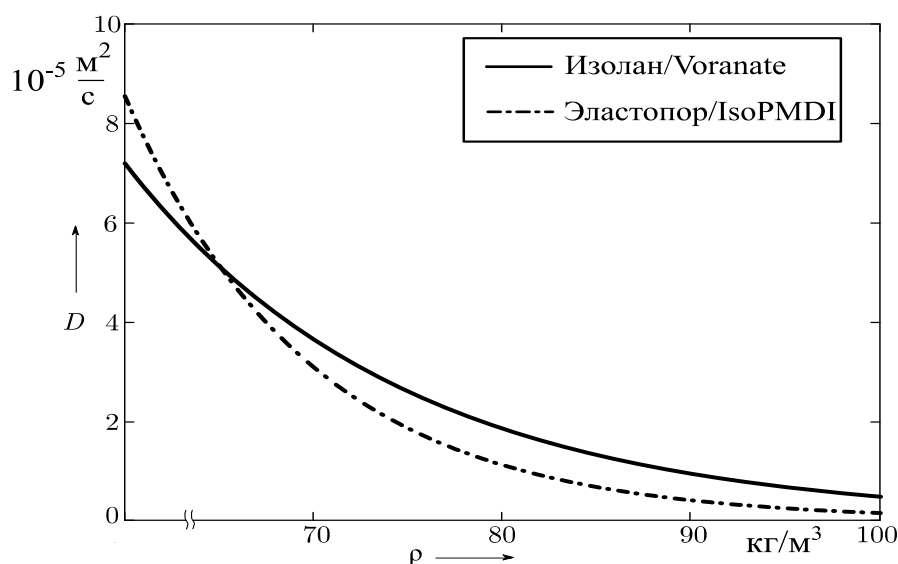


Рис. 4. Зависимости коэффициента диффузии влаги от плотности ППУ

Полученные значения коэффициентов диффузии позволяют оценить скорость распространения влаги в слое ППУ.

Для построения математической модели влагопереноса в слое ППУ-изоляции рассмотрим бесконечную пластину из ППУ, нижняя граница которой контактирует с водой. Такая постановка задачи позволяет использовать одномерное решение уравнения диффузии

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $u(x, t)$ – функция, описывающая распределение концентрации влаги в толщине ППУ слоя в различные моменты времени.

Уравнение (2) необходимо дополнить граничным условием $u(0, t) = 1$ и начальным условием $u(x, 0) = 0$.

Применяя к (2) преобразование Лапласа, получим обыкновенное дифференциальное уравнение вида

$$p\hat{u}(x) = D \frac{d^2\hat{u}}{dx^2}.$$

Решение данного уравнения с учетом операторного изображения граничного условия $\hat{u}(0) = 1/p$ имеет вид

$$\hat{u}(x) = \frac{1}{p} e^{-\sqrt{p} \frac{x}{\sqrt{D}}}.$$

Переходя к оригиналу, получаем функцию, которая является решением уравнения (2) при заданных начальном и граничном условиях:

$$u(x, t) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D}\sqrt{t}}\right), \quad (3)$$

где $\operatorname{erf}(z)$ – функция ошибок, $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$.

Формула (3) позволяет исследовать динамику увлажнения изоляционного слоя ППУ. Получим кривые изменения влажности в точке, соответствующей размещению проводника системы оперативного дистанционного контроля, а также в точках предполагаемого размещения цифровых датчиков влажности альтернативной системы контроля, предложенной в [10]. Кривые изменения концентрации для двух наборов образцов плотностью 60 и 80 кг/м³ представлены на рис. 5 и 6.

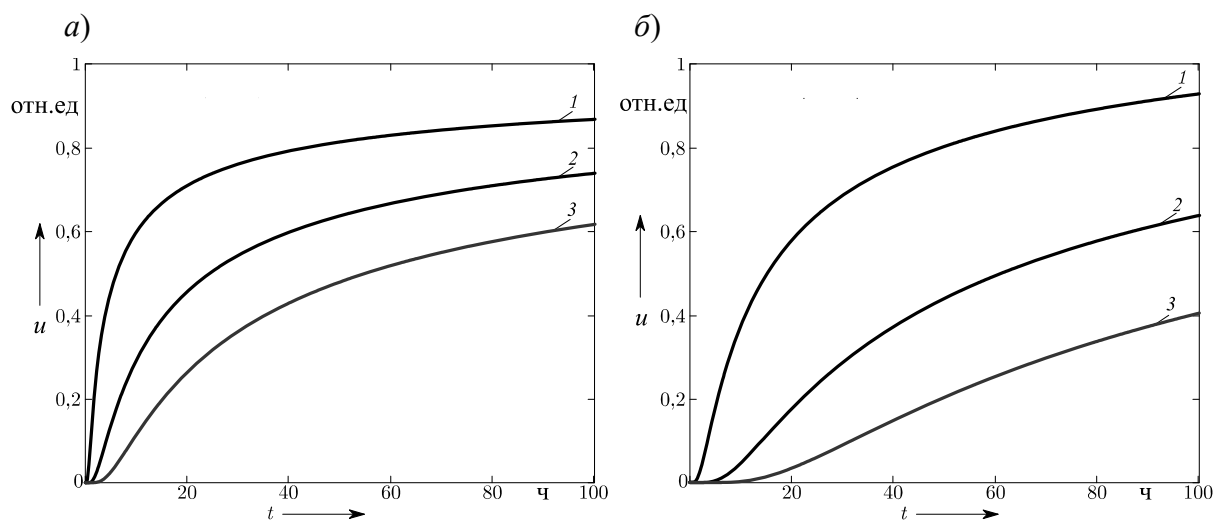


Рис. 5. Динамика изменения влажности в слое ППУ на основе компонентов Изолан А350(ф) и Vorganate M225 плотностью 60 кг/м³ (а) и 80 кг/м³ (б) на расстояниях 20 мм (кривая 1), 40 мм (кривая 2), 60 мм (кривая 3) от источника увлажнения

Анализ зависимостей позволяет установить следующее. Максимальная скорость увлажнения ППУ наблюдается через $t_1 \approx 1,0$ ч для ППУ на основе Изолан и Vorganate плотностью 60 кг/м³ и $t_2 \approx 3,5$ ч, если плотность материала составляет 80 кг/м³, при этом значение максимальной скорости в случае ППУ

меньшей плотности примерно в 3,8 раза выше. Аналогичные показатели для ППУ на основе Эластопор и IsoPMDI имеют значения $t_1 \approx 0,8$ ч и $t_2 \approx 5,9$ ч, соответственно, максимальная скорость увлажнения ППУ меньшей плотности в этом случае примерно в 5,9 раз выше.

Построим также кривые распре-

деления концентрации влаги в слое ППУ в различные моменты времени для

ППУ на основе Изолан и Voranate и Эластопор и IsoPMDI (рис. 7).

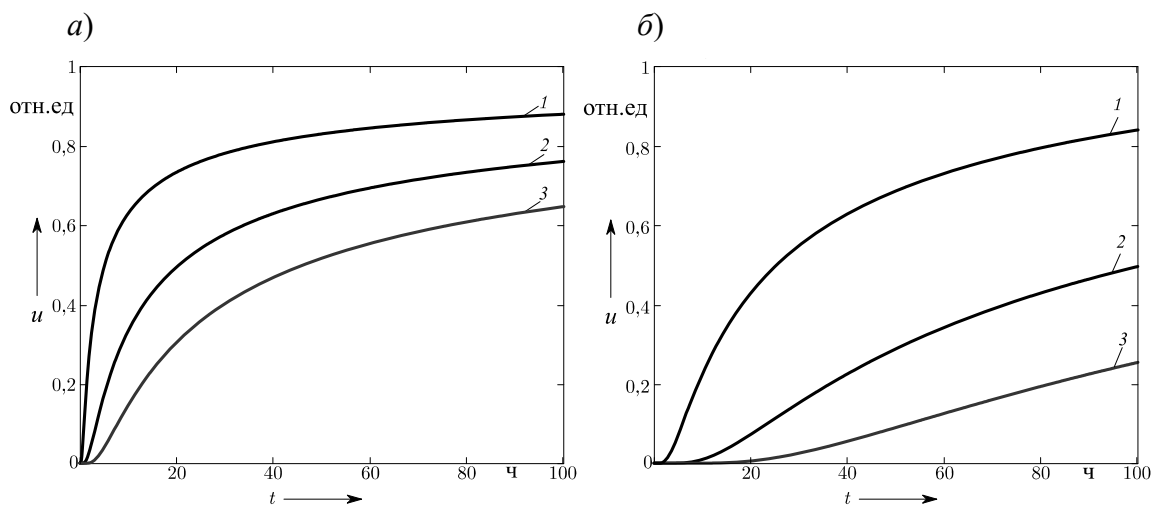


Рис. 6. Динамика изменения влажности в слое ППУ на основе компонентов Эластопор H2130 и IsoPMDI плотностью 60 кг/м^3 (а) и 80 кг/м^3 (б) на расстояниях 20 мм (кривая 1), 40 мм (кривая 2), 60 мм (кривая 3) от источника увлажнения

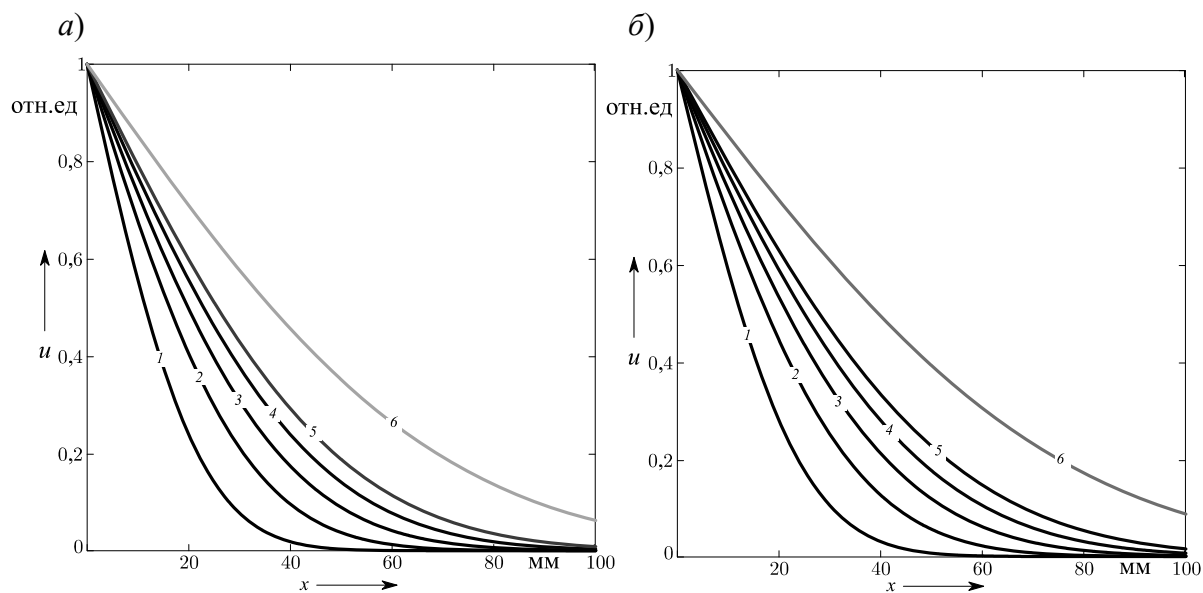


Рис. 7. Профили концентрации влаги в слое ППУ на основе компонентов Изолан и Voranate (а) и Эластопор и IsoPMDI (б): 1 – спустя 2 ч; 2 – спустя 4 ч; 3 – спустя 6 ч; 4 – спустя 8 ч; 5 – спустя 10 ч; 6 – спустя 20 ч

Сравнение с экспериментом

С целью проверки полученной модели был выполнен эксперимент на специально подготовленном образце ППУ-изоляции со средней плот-

ностью 60 кг/м^3 на основе компонентов Изолан и Voranate с размещенными до начала реакции датчиками влажности по следующей схеме.

Датчик расположен на расстоянии 20 мм от поверхности с точечным

отверстием, имитирующим дефект. Эксперимент проводился в течение 20 ч при давлении жидкости 1,8 МПа. Полу-

ченная в результате данного эксперимента зависимость представлена на рис. 8.

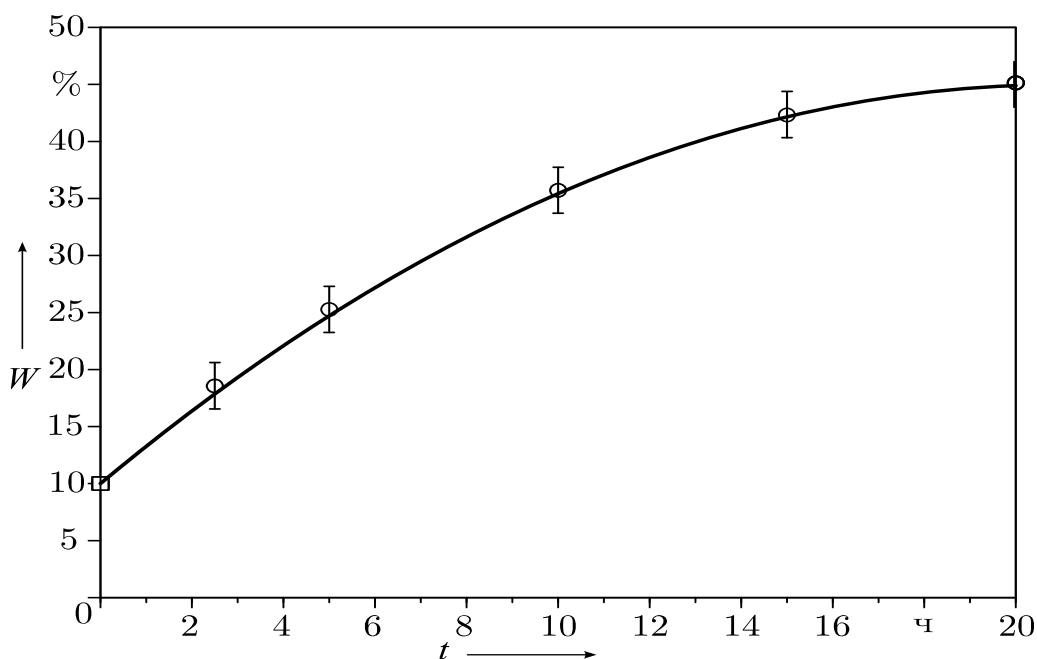


Рис. 8. Экспериментальная кривая изменения влажности слоя ППУ-изоляции на расстоянии 20 мм от источника увлажнения

Следует отметить, что примерно через 1 ч после начала эксперимента скорость изменения влажности, регистрируемая датчиком, расположенным непосредственно над дефектом, максимальна и составляет примерно 12 % в час, что хорошо согласуется с результатом, полученным с помощью формулы (3).

Заключение

Представленная модель позволяет получить представление о скорости диффузии влаги в слое ППУ-изоляции при наличии повреждений трубы или защитной оболочки и может использоваться для оптимизации количества датчиков и их расположения при проектировании цифровых систем оперативного дистанционного контроля состояния ППУ-изоляции, а также в исследова-

ниях систем оперативного дистанционного контроля методами импульсной рефлектометрии. Полученные зависимости позволяют отметить, что для уверенной регистрации наличия повреждения (утечки) традиционной системой оперативного дистанционного контроля требуется не менее 10 ч, при этом чувствительность цифрового датчика влажности дает возможность определить наличие дефекта гораздо раньше, тем самым предотвратить возможную аварийную ситуацию. Динамика диффузии влаги в реальной системе зависит от множества факторов, включая температуру теплоносителя и окружающей среды, качество и состав компонентов ППУ, учет которых требует дополнительных экспериментов и является предметом отдельного исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Келлнер, Ю.** Способы производства теплоизолированных пенополиуретановых труб для систем централизованного теплоснабжения / Ю. Келлнер // Трубопроводы и экология. – 2002. – № 3. – С. 24–26.
2. Пластмассы ячеистые и резины губчатые. Метод определения кажущейся плотности: ГОСТ 409–2017. – Введ. 01.07.2018. – Москва : Стандартинформ. – 2017. – 13 с.
3. Весы лабораторные. Общие технические требования: ГОСТ 24104–2001. – Введ. 01.07.2002. – Москва: Стандартинформ. – 2007. – 8 с.
4. Методика оценки влияния влажности на эффективность теплоизоляции оборудования и трубопроводов. – Москва : Теплопроект. – 2004. – 18 с.
5. Пластмассы. Метод определения водопоглощения: ГОСТ 4650–2014. – Введ. 01.03.2015. – Москва: Стандартинформ. – 2014. – 20 с.
6. **Герасименко, Н. В.** Исследование водопоглощения жесткого пенополиуретана / Н. В. Герасименко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос ун-т, 2021. – С. 141.
7. **Низовцев, М. И.** Экспериментальное определение коэффициентов диффузии влаги в пористых материалах при капиллярном и сорбционном увлажнении / М. И. Низовцев, С. В. Станкус, А. Н. Стерлягов // Инж.-физ. журн. – 2005. – Т. 78, № 1. – С. 67–73.
8. **Жилин, А. А.** Физико-математическое моделирование процессов капиллярной пропитки пористых материалов / А. А. Жилин, А. В. Федоров // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50, № 1. – С. 42–51.
9. **Берлинер, М. А.** Измерения влажности / М. А. Берлинер. – Москва: Энергия, 1973. – 400 с.
10. **Болотов, С. В.** Цифровая система оперативного дистанционного контроля состояния изоляции гибких ПИ-труб / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко, В. Н. Почуйко // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2018. – Т. 1. – С. 13–19.

Статья сдана в редакцию 24 ноября 2022 года

Никита Васильевич Герасименко, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: gerasimenko_nikita@hotmail.com.

Nikita Vasilievich Gerasimenko, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: gerasimenko_nikita@hotmail.com.