

УДК: 615.9

**ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВТОРИЧНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ В МОДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ, ИМИТИРУЮЩИХ ПРОМЫШЛЕННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВЫ НЕФТЕПРОДУКТАМИ И ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

Алексеева А.В., Савостикова О.Н., Мамонов Р.А., Каменецкая Д.Б.

ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, Москва, Россия

*В статье представлены результаты исследования возможности вторичного загрязнения питьевой воды при прокладке полимерных труб на урбанизированных и промышленных территориях, с высоким уровнем загрязнения почвы различными органическими растворителями и нефтепродуктами. В результате изменения химической структуры полимера, вплоть до его разрушения, возможно поступление в питьевую воду химических и биологических загрязнений, присутствующих в почве.*

**Цель исследования** - изучение возможности миграции загрязняющих веществ через полимерные трубы в питьевую воду.

**Материалы и методы.** Для испытаний были использованы трубы из полиэтилена (ПЭВП) как обладающие наибольшей среди используемых полимеров диффузионной селективностью. Трубы в эксперименте заполняли дистиллированной водой. В контрольной емкости трубы засыпались чистым песком, в опытной емкости песок обрабатывали бензином, имитируя сильнозагрязненную почву с концентрацией нефтепродуктов 3000 мг/кг. Также в опытной емкости песок дополнительно загрязнялся металлами, такими как никель, свинец, марганец, медь, молибден, железо, хром, цинк. Время контакта - от 1,5 до 2 месяцев.

**Результаты.** В процессе длительного контакта труб с загрязненной углеводородами почвой происходит миграция органических веществ через стенки труб в дистиллированную воду. Интенсивность миграции зависит от времени контакта и наличия дополнительного защитного полимерного слоя на трубах. Повышение пористости и проницаемости полиэтилена под воздействием жидких углеводородов при двухмесячном периоде контакта недостаточно для поступления в питьевую воду неорганических примесей, присутствующих в почве. Таким образом, для обеспечения безопасности питьевого водоснабжения населенных мест необходимым условием является подбор конструкционных материалов труб с учетом санитарного состояния территорий.

**Ключевые слова:** водопроводные трубы, питьевая вода, вторичное загрязнение, нефтепродукты, полимерные материалы.

**Для цитирования:** Алексеева А.В., Савостикова О.Н., Мамонов Р.А., Каменецкая Д.Б. Изучение возможности вторичного загрязнения питьевой воды в модельных условиях, имитирующих промышленное загрязнение почвы нефтепродуктами и тяжелыми металлами. Медицина труда и экология человека. 2022;3:115-124.

**Для корреспонденции:** Алексеева Анна Венидиктовна, канд.мед.наук, начальник отдела гигиены ФГБУ «ЦСП» ФМБА России. E-mail: AAlekseeva@cspmtz.ru.

**Финансирование:** исследования проводились в рамках государственного задания по теме «Совершенствование государственной системы контроля и обеспечения химической безопасности окружающей среды для здоровья населения с учетом процессов трансформации веществ» в ФГБУ «ЦСП» ФМБА России.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.24411/2411-3794-2022-10310>

## STUDY ON THE POSSIBILITY OF SECONDARY POLLUTION OF DRINKING WATER UNDER MODEL CONDITIONS SIMULATING INDUSTRIAL CONTAMINATION OF SOIL WITH OIL PRODUCTS AND HEAVY METALS

Alekseeva A.V., Savostikova O.N., Mamonov R.A., Kamenetskaya D.B.

Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks of the Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

*The article presents the results of a study on the possibility of secondary contamination of drinking water in the case of laying polymer pipes in urbanized and industrial areas where there is a high level of soil contamination with various organic solvents and oil products. As a result of the destruction of the polymer material, changes in its chemical structure, not only organic pollutants, but also other chemical and biological pollutants present in the soil may enter drinking water.*

**The purpose of the study** is to study the possibility of penetration of organic pollutants through polymer pipes for contamination of drinking water.

**Materials and methods.** Polyethylene (HDPE) pipes were used for testing, as they have the highest diffusion selectivity among the polymers used. The pipes in the experiment were filled with distilled water. In the control tank, the pipes were filled with clean sand, in the experimental tank, the sand was treated with gasoline, simulating highly polluted soil with a concentration of petroleum products of 3000 mg/kg. Also in the experimental tank, the sand was additionally contaminated with metals such as nickel, lead, manganese, copper, molybdenum, iron, chromium, zinc. The contact time is from 1.5 to 2 months.

**Results.** During the long-term exposure of the pipe walls to the soil contaminated with hydrocarbons, organic substances migrate through the pipe walls into distilled water. The intensity of migration depends on the exposure time and the presence of an additional protective polymer layer on the pipes. An increase in the porosity and permeability of polyethylene under the influence of liquid hydrocarbons with a two-month contact period is not enough for the inorganic impurities present in the soil to enter the drinking water. Thus, a necessary condition for laying new pipelines to ensure the safety of drinking water supply in populated areas is the selection of pipe construction materials taking into account the sanitary condition of the territories.

**Keywords:** water pipes, drinking water, secondary pollution, oil products, polymeric materials.

**Citation:** Alekseeva A.V., Savostikova O.N., Mamonov R.A., Kamenetskaya D.B. Study on the possibility of secondary pollution of drinking water under model conditions simulating industrial contamination of soil with oil products and heavy metals. *Occupational Health and Human Ecology*. 2022;3:115-124.

**Correspondence:** Anna V. Alekseeva, Candidate of Medicine, Head of the hygiene department of the Federal State Budgetary Institution "CSP" of the FMBA of Russia. E-mail: AAlekseeva@cspmz.ru.

**Financing.** The studies were carried out within the framework of the state task on the topic "Improving the state system for monitoring and ensuring the chemical safety of the environment for public health, taking into account the processes of transformation of substances" at the Federal State Budgetary Institution "CSP" of the FMBA of Russia.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.24411/2411-3794-2022-10310>

В настоящее время более чем 40% водопроводных сетей в Российской Федерации нуждаются в замене [1], в этом плане необходимым условием при прокладке новых трубопроводов для обеспечения безопасности питьевого водоснабжения населенных мест является подбор конструкционных материалов труб с учетом санитарного состояния территорий. Этот аспект наиболее важен при применении труб питьевого водоснабжения, изготовленных из полимерных материалов [2], что связано в том числе и с различной степенью их диффузионной проницаемости.

Анализ ряда зарубежных публикаций свидетельствует о том, что при прокладке полимерных труб на урбанизированных и промышленных территориях, где установлен высокий уровень загрязнения почвы различными органическими растворителями и нефтепродуктами, в результате их воздействия на внешнюю поверхность труб происходит повышение их пористости и проницаемости, а в дальнейшем разрушение полимерного материала в результате изменения его химической структуры с последующим поступлением в питьевую воду не только органических загрязнений, но и других химических и биологических загрязнений, присутствующих в почве.

Это достаточно распространенная ситуация в промышленных регионах, где разливы и утечки нефтепродуктов (бензин, дизельное топливо, моторные масла), вызывают широкомасштабное загрязнение недр. Нефтепродукты из загрязненной почвы и грунтовых вод могут проникать через термопластовые трубы и прокладки, которые используются в системах водоснабжения, что приводит к вторичному загрязнению питьевой воды [3-7].

Случаи загрязнения нефтепродуктами полиэтиленовых водопроводных труб в реальных условиях эксплуатации были показаны в работах [5,8-13], также были изучены процессы проникновения химических соединений сквозь полиэтиленовые трубы в воду в лабораторных условиях [6,14].

Среди нефтяных углеводородов, загрязняющих почву, бензол вызывает наибольшую озабоченность, поскольку является известным канцерогеном [12]. В нескольких исследованиях в результате поступления бензола через стенку трубы на загрязненных земельных участках его концентрации установлены в питьевой воде от 13 до 1300 мкг/л после периода застоя воды в полиэтиленовых трубах [8,9,12]. В исследованиях [6, 14] было обнаружено, что проникновение бензола через трубу из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) диаметром 2,5 см осуществляется достаточно быстро: время попадания в воду при прямом контакте трубы с бензином - 5 дней и 15 дней при воздействии насыщенных

бензином грунтовых вод. Смоделированные кривые проникновения бензола показали, что трубы малого диаметра были менее надежны, чем трубы большого диаметра, проникновение бензола в трубу из ПЭВП замедлялось с увеличением толщины трубы.

Проникновение органических загрязняющих веществ через полиэтиленовые трубы состоит из трех этапов: сорбция, состоящая из перехода молекул загрязняющих веществ из загрязненной почвы и грунтовых вод, диффузия сорбированных молекул загрязняющих веществ через аморфную область в материалах трубы и десорбция молекул загрязняющих веществ из трубы в воду. На это влияют различные факторы: молекулярная масса, размер и форма органических соединений; плотность, кристалличность, толщина, степень сшивания, жесткость цепи и старение полимера; химическое сходство между полимером и органическими соединениями; начальная объемная концентрация органических соединений [13-17]. Для системы ПЭ-труба - загрязнение эти вышеперечисленные факторы могут быть количественно определены некоторыми критическими параметрами, такими как растворимость, диффузионная способность (коэффициент диффузии), проницаемость, толщина стенки трубы и уровни загрязнения окружающей среды. Нет достаточной информации для оценки степени, в которой влияют каждый процесс и параметр [18]. Уровень проницаемости труб из полимерных материалов в конкретных условиях их прокладки не может быть спрогнозирован, так как неизвестно количество влияющих на этот процесс факторов и величин.

Помимо существующей миграции химических соединений из полимерных материалов [19], необходимо иметь в виду возможность аварийных ситуаций, связанных со вторичным загрязнением питьевой воды в результате разливов нефтяных продуктов, так как повторное загрязнение полиэтиленовых труб бензолом реально при уровнях загрязнения, обычно возникающих в результате разливов сырой нефти.

**Целью** данной работы явилось изучение возможности миграции загрязняющих веществ через полимерные трубы в питьевую воду.

**Материалы и методы.** Для исследований были использованы трубы из полиэтилена (ПЭВП) как обладающие наибольшей среди используемых полимеров диффузионной селективностью (способностью полимерной матрицы пропускать молекулы определенной формы и размера).

Испытания проводились на полиэтиленовых трубах, изготовленных по ГОСТ 18599-2001 Трубы напорные из полиэтилена: напорной трубе для питьевого водоснабжения (образец №1) и трубе из того же материала с дополнительной защитной оболочкой из термопласта на наружной поверхности (образец №2). Отрезки труб длиной 250 мм снизу и сверху были заглушены приваренными донышками. С верхней стороны исследуемых образцов вварены две трубки для заполнения труб водой и отбора проб, одна трубка проходит до нижнего донышка, вторая заканчивается после прохождения верхней крышки. Трубки герметично закрывались притертыми пробками.

Образцы труб заполняли дистиллированной водой и затем плотно закрывали пробками. Емкости с испытываемыми трубами полностью засыпали песком, оставляя на поверхности только верхнюю крышку с закрытыми трубками. В эксперименте использовали две емкости: в контрольной емкости трубы засыпались чистым песком, в опытной емкости

песок обрабатывался бензином, имитируя сильнозагрязненную почву с концентрацией нефтепродуктов 3000 мг/кг. Также в опытной емкости песок дополнительно загрязнялся металлами, такими как никель, свинец, марганец, хром, цинк, медь, в качестве дополнительного контроля изменения пористости полимерного материала и моделирования возможной проницаемости стенок труб для химического загрязнения. Верхние крышки труб загрязненным песком не засыпались, в нижних слоях песка не наблюдалось скопления нефтепродуктов. Длительность экспозиции составила до двух месяцев при температуре  $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Анализ на нефтепродукты проводился тотчас же после отбора пробы методом газовой хроматографии по ГОСТ 31953-2012, определение металлов в воде выполняли на атомно-абсорбционном спектрофотометре МГА-915 в соответствии с ГОСТ 31870-2012, органических соединений - в соответствии с НДП 30.1.2:3.72-09, НДП 30.1.2.:3.68-2009 на хромато-масс-спектрометре Focus GC с DSQ II (США).

**Результаты исследования и их обсуждение.** Из представленных в таблице 1 данных видно, что в процессе длительного контакта (45-60 суток) стенок труб, изготовленных из полиэтилена, с загрязненной нефтяными углеводородами почвой происходит миграция органических веществ через стенки труб в дистиллированную воду.

Таблица 1

**Содержание нефтепродуктов в водных вытяжках исследуемых образцов (n=3, показатель точности (границы абсолютной погрешности P=0.95))**

Table 1

**The content of oil products in water extracts of the studied samples (n=3, accuracy index (absolute error limits P=0.95))**

№	Исследуемые образцы	Нефтепродукты, мг/л	
		45 суток	60 суток
1	Контроль 1	$<C_{\min}$	$<C_{\min}$
2	Проба 1	$0,24\pm 0,13$	$0,32\pm 0,17$
3	Контроль 2	$<C_{\min}$	$<C_{\min}$
4	Проба 2	$0,12\pm 0,07$	$0,22\pm 0,12$

Интенсивность миграции зависит от времени контакта и наличия дополнительного защитного полимерного слоя на трубах. Так, содержание нефтепродуктов на 45-е сутки в пробе из трубы, изготовленной по ГОСТ 18599-2001 (образец №1), было почти в два раза больше и составило 0,24 мг/л (2,4 ПДК) по сравнению с трубой, имеющей защитный слой (образец №2) - 0,12 мг/л (1,2 ПДК). Концентрация нефтепродуктов в пробах дистиллированной воды нарастала с течением времени и через 2 месяца составляла уже 0,32 мг/л (3,2 ПДК) для трубы ГОСТ 18599-2001 (образец №1) и 0,22 мг/л (2,2 ПДК) для трубы с защитным слоем (образец №2).

Анализ неорганических веществ в водных вытяжках проводился методами атомной спектроскопии по ГОСТ 31870-2012. Установлено, что на 60-е сутки опыта миграция неорганических веществ из почвы через стенку полиэтиленовых труб практически не

наблюдалась. Обнаружение в пробах никеля в концентрации 0,005-0,007 мг/л, свинца – 0,002-0,004 мг/л, хрома - 0,002-0,003 мг/л и других металлов обусловлено миграцией их из самого полимерного материала, так как их значения практически совпадают как в контроле, так и в опыте.

Таблица 2

**Содержание металлов в дистиллированной воде внутри исследуемых образцов (n=3, показатель точности (границы абсолютной погрешности P=0,95))**

Table 2

**The content of metals in distilled water, inside the studied samples (n=3, accuracy index (absolute error limits P=0.95))**

№ п/п	Химическое вещество	ПДК не более, мг/л (СанПиН 1.2.3685-21),	Концентрация, мг/л			
			контроль 1	контроль 2	проба 1	проба 2
1	Марганец	0,1	<C <sub>min</sub>	0,001± 0,0001	0,001± 0,0001	<C <sub>min</sub>
2	Медь	1	0,0013± 0,0001	0,0013± 0,0001	0,0013± 0,0001	0,004± 0,0004
3	Никель	0,02	0,005± 0,0005	0,005± 0,0005	0,007± 0,0007	0,006± 0,0006
4	Свинец	0,01	0,004± 0,0004	0,002± 0,0002	<C <sub>min</sub>	0,002± 0,0002
5	Хром	0,05	0,003± 0,0003	0,002± 0,0002	0,003± 0,0003	0,002± 0,0002
6	Цинк	5	0,05± 0,005	0,04± 0,004	0,04± 0,004	0,03± 0,003

Таким образом, повышение пористости и проницаемости полиэтилена под воздействием жидких углеводородов при двухмесячном периоде контакта недостаточно для последующего поступления в питьевую воду неорганических примесей, присутствующих в почве.

Для определения степени возможного разрушения полиэтиленового материала под воздействием органических загрязнителей проведены исследования, ориентированные на идентификацию и количественное определение органических веществ в воде хромато-масс-спектрометрическим методом.

При анализе водных вытяжек (n=3, P=0,95) из контрольной и опытных групп идентифицирован ряд органических соединений, относящихся к кислородсодержащим веществам, для большей части которых не установлены ПДК: гексадеканол, ди-трет-бутилфенол, диоксапентадекан, ди-трет-бутил-оксаспиродекадиендион, диметилфталат, диизобутилфталат и другие.

Наибольший вклад в загрязнение водных вытяжек из исследованных образцов вносили ди-трет-бутил-оксаспиродекадиендион (0,395- 0,185 мг/л), 2,4-ди-трет-бутилфенол в концентрациях от 0,044 до 0,156 мг/л, диметил- и диизобутилфталаты, суммарная концентрация которых определялась на уровне от 0,093 до 0,015 мг/дм<sup>3</sup>.

Существенной разницы между содержанием и концентрациями органических веществ в контрольном и опытных образцах обнаружено не было, за исключением увеличения содержания в вытяжке из опытной трубы без защитного покрытия продукта разложения антиоксидантов - 2,4-ди-трет-бутилфенола до 0,156 мг/л и меньшего вымывания из нее ди-трет-бутил-оксаспиродекадиендиона.

Таким образом, двухмесячный период контакта загрязненной нефтепродуктами почвы со стенками полиэтиленовых труб не приводит к выраженному разрушению полимерного материала (полиэтилена) в трубах с защитным покрытием, в то же время отмечено увеличение миграции 2,4-ди-трет-бутилфенола из полиэтиленовой трубы без защитного покрытия, что может говорить о преждевременном старении материала.

При возникновении аварийных случаев вторичного загрязнения питьевой воды в литературе рекомендуется промывание загрязненного участка водопровода [5,8,11,18,20]. В рассмотренных источниках авторы рекомендуют достаточно разные временные промежутки промывки труб, начиная от 30 минут и более. Однако все соглашаются с тем, что необходимо установить мониторинг и отследить динамику концентраций загрязняющих веществ в питьевой воде.

**Заключение.** Таким образом, проведенные исследования показали, что необходимым условием при прокладке новых трубопроводов для обеспечения безопасности питьевого водоснабжения населенных мест является подбор конструкционных материалов труб с учетом санитарного состояния территорий. На урбанизированных и промышленных территориях, имеющих высокий уровень загрязнения почвы различными органическими растворителями и нефтепродуктами, трубопроводы должны сооружаться из непроницаемых для химических веществ труб, например из высокопрочного чугуна, имеющего длительный опыт эксплуатации, так как данный материал непроницаем для всех загрязняющих веществ (органические растворители, нефтяные углеводороды, фенолы, толуол и т.д.).

В результате воздействия с внешней поверхностью полиэтиленовых труб органических загрязнений почвы возможно повышение пористости и проницаемости полимерного материала с последующим поступлением в питьевую воду не только органических загрязнений, но и других химических и биологических загрязнений, присутствующих в почве.

#### Список литературы:

1. ЕМИСС. Государственная статистика. Доступно по адресу: <https://www.fedstat.ru/indicator/43556>
2. Алексеева А.В., Савостикова О.Н., Мамонов Р.А. Сравнительный анализ методов оценки возможности применения полимерных материалов в питьевом водоснабжении, закрепленных в законодательствах России и Германии. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019; 10 (2): 263-267.
3. Ong S. K., Gaunt J. A., Mao F., Cheng C. L., Agelet L. E. Impact of petroleum-based hydrocarbons on PE/PVC pipes and pipe gaskets. AwwaRF. Denver. 2007;10.

4. Cheng C. L., Gaunt J. A., Mao F., & Ong S. K. Permeation of gasoline through DI pipe gaskets in water mains. *Journal-American Water Works Association*. 2012; 104. 4: E271-E281.
5. Casteloes KS, Mendis GP, Avins HK, Howarter JA, and Whelton AJ. The interaction of surfactants with plastic and copper plumbing materials during decontamination. *J. Hazard. Mater.* 2017; 325: 8–16. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.067
6. Mao F., Gaunt JA., Cheng, C. L., Ong SK. Permeation of BTEX compounds through HDPE pipes under simulated field conditions. *Journal-American Water Works Association*. 2010; 102(3): 107-118.
7. Jones D, Rowe RK. BTEX migration through various geomembranes and vapor barriers. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2016;142(10):04016044. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001502.
8. Casteloes KS, Brazeau R, Whelton A. Decontaminating chemically contaminated residential premise plumbing systems by flushing. *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 2015; 1(6): 787–799. doi: 10.1039/C5EW00118H.
9. Kelley KM, Stenson AC, Dey R, Whelton AJ. Release of drinking water contaminants and odor impacts caused by green building cross-linked polyethylene (PEX) plumbing systems. *Water Res.* 2014 Dec 15;67:19-32. doi: 10.1016/j.watres.2014.08.051.
10. Chao KP, Wang P, Wang YT. Diffusion and solubility coefficients determined by permeation and immersion experiments for organic solvents in HDPE geomembrane. *J Hazard Mater.* 2007 Apr 2;142(1-2):227-35. doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.08.022
11. Huang X, Andry S, Yaputri J, Kelly D, Ladner DA, and Whelton AJ. Crude oil contamination of plastic and copper drinking water pipes. *J. Hazard. Mater.* 2017; 339: 385–394. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.06.015.
12. Holsen TM., Park JK., Jenkins D., Selleck RE. Contamination of Potable Water by Permeation of Plastic Pipe. *Journal AWWA*. 1991. 01 August. 83. 53-56. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1991.tb07199.x>
13. Whelton AJ, McMillan L, Connell M, Kelley KM, Gill JP, White KD, Gupta R, Dey R, Novy C. Residential tap water contamination following the freedom industries chemical spill: Perceptions, water quality, and health impacts. *Environ. Sci. Technol.* 2015; 49(2):813–823. doi: 10.1021/es5040969.
14. Mao F, Ong SK, Gaunt JA. Modeling benzene permeation through drinking water high density polyethylene (HDPE) pipes. *J Water Health.* 2015 Sep;13(3):758-772. doi: 10.2166/wh.2015.183.
15. Thomas M. Holsen, Jae K. Park, Laurent Bontoux, David Jenkins, Robert E. Selleck. The Effect of Soils on the Permeation of Plastic Pipes by Organic Chemicals. *Journal AWWA*. 01 August. 83. 11: 85-91 <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1991.tb07253.x>
16. Saquing J. M., Saquing C. D., Knappe D. U., Barlaz M. A. Impact of plastics on fate and transport of organic contaminants in landfills. *Environ. Sci. Technol.* 2010; 44 (16): 6396–6402
17. Whelton, A. J., Dietrich, A. M., Gallagher, D. L. Contaminant diffusion, solubility, and material property differences between HDPE and PEX potable water pipes. *J. Environ. Eng.* 2010; 136 (2): 227–237

18. Islam M. Z., Rowe R. K. Permeation of BTEX through unaged and aged HDPE geomembranes. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2009;135 (8): 1130–1140.
19. Алексеева А.В., Савостикова О.Н. Гигиеническая оценка возможности применения полиуретановых покрытий в практике питьевого водоснабжения. *Гигиена и санитария.* 2022; 5:487-493.
20. Hauptert LM, Magnuson ML. Numerical Model for Decontamination of Organic Contaminants in Polyethylene Drinking Water Pipes in Premise Plumbing by Flushing. *J Environ Eng (New York).* 2019 Jul 1; 145(7) 10. doi: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001542.

#### References:

1. EMISS State Statistics. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/43556>
2. Alekseeva A.V., Savostikova O.N., Mamonov R.A. Methodical issues of assessment of possibility of application in drinking water supply of polymeric materials. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanij.* 2019: 10-2: 263-267 (in Russian).
3. Ong S. K., Gaunt J. A., Mao F., Cheng C. L., Agelet L. E. Impact of petroleum-based hydrocarbon on PE/PVC pipes and pipe gaskets. *AWWA RF.* Denver. 2007; 99.
4. Cheng C. L., Gaunt J. A., Mao F., & Ong S. K. Permeation of gasoline through DI pipe gaskets in water mains. *Journal-American Water Works Association.* 2012; 104. 4: E271-E281.
5. Casteloes KS, Mendis GP, Avins HK, Howarter JA, and Whelton AJ. The interaction of surfactants with plastic and copper plumbing materials during decontamination. *J. Hazard. Mater.* 2017; 325: 8 – 16. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.067
6. Mao F., Gaunt JA., Cheng, C. L., Ong SK. Permeation of BTEX compounds through HDPE pipes under simulated field conditions. *Journal-American Water Works Association.* 2010; 102(3): 107-118.
7. Jones D, Rowe RK. BTEX migration through various geomembranes and vapor barriers. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2016; 142(10):04016044. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001502.
8. Casteloes KS, Brazeau R, Whelton A. Decontaminating chemically contaminated residential premise plumbing systems by flushing. *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 2015; 1(6): 787–799. doi: 10.1039/C5EW00118H.
9. Kelley KM, Stenson AC, Dey R, Whelton AJ. Release of drinking water contaminants and odor impacts caused by green building cross-linked polyethylene (PEX) plumbing systems. *Water Res.* 2014 Dec 15; 67: 19-32. doi: 10.1016/j.watres.2014.08.051.
10. Chao KP, Wang P, Wang YT. Diffusion and solubility coefficients determined by permeation and immersion experiments for organic solvents in HDPE geomembrane. *J Hazard Mater.* 2007 Apr 2; 142(1-2):227-35. doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.08.022
11. Huang X, Andry S, Yaputri J, Kelly D, Ladner DA, and Whelton AJ. Crude oil contamination of plastic and copper drinking water pipes. *J. Hazard. Mater.* 2017; 339: 385–394. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.06.015.
12. Holsen TM., Park JK., Jenkins D., Selleck RE. Contamination of Potable Water by Permeation of Plastic Pipe. *Journal AWWA.* 1991. 01 August. 83. 53-56. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1991.tb07199.x>

13. Whelton AJ, McMillan L, Connell M, Kelley KM, Gill JP, White KD, Gupta R, Dey R, Novy C. Residential tap water contamination following the freedom industries chemical spill: Perceptions, water quality, and health impacts. *Environ. Sci. Technol.* 2015; 49(2):813–823. doi: 10.1021/es5040969.
14. Mao F, Ong SK, Gaunt JA. Modeling benzene permeation through drinking water high density polyethylene (HDPE) pipes. *J Water Health.* 2015 Sep;13(3):758-772. doi: 10.2166/wh.2015.183.
15. Thomas M. Holsen, Jae K. Park, Laurent Bontoux, David Jenkins, Robert E. Selleck. The Effect of Soils on the Permeation of Plastic Pipes by Organic Chemicals. *Journal AWWA.* 01 August. 83. 11: 85-91 <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1991.tb07253.x>
16. Saquing J. M. Saquing C. D. Knappe D. U. Barlaz M. A. Impact of plastics on fate and transport of organic contaminants in landfills. *Environ. Sci. Technol.* 2010; 44 (16): 6396–6402
17. Whelton, A. J., Dietrich, A. M., Gallagher, D. L. Contaminant diffusion, solubility, and material property differences between HDPE and PEX potable water pipes. *J. Environ. Eng.* 2010; 136 (2): 227–237
18. Islam M. Z. Rowe R. K. Permeation of BTEX through unaged and aged HDPE geomembranes. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2009; 135 (8): 1130–1140.
19. Alekseeva A.V., Savostikova O.N. Hygienic assessment of the possibility of using polyurethane coatings in the practice of drinking water supply. *Gigiena i sanitariya.* 2022; 5: 487-493 (in Russian).
20. Hauptert LM, Magnuson ML. Numerical Model for Decontamination of Organic Contaminants in Polyethylene Drinking Water Pipes in Premise Plumbing by Flushing. *J Environ Eng (New York).* 2019 Jul 1; 145(7) 10. doi: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001542.

Поступила/Received: 24.06.2022

Принята в печать/Accepted: 16.08.2022