

УДК 621.644, 621.22-225

## ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЗАСОРЕННЫХ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Е.А. Локтионова<sup>1</sup>, Д.Р. Мифтахова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований напорного трубопровода с искусственным засорением. Подтвержден вывод о наиболее существенном снижении пропускной способности трубопроводов в первые годы их эксплуатации. Получен график зависимости, позволяющий приближенно определять степень засорения трубопровода при известном падении расхода в нем в процессе эксплуатации, а также находить предельное засорение трубы, при котором поток жидкости в трубе практически отсутствует. Расширена имеющаяся в литературе оценка снижения пропускной способности трубопровода в процессе эксплуатации на область малых диаметров по данным опытов с искусственным засорением. Показана возможность прогнозирования изменения пропускной способности трубопровода на основании исследований с искусственным засорением.

**Ключевые слова:** напорный трубопровод, пропускная способность трубопровода, относительный расход, степень засорения, срок эксплуатации.

**Ссылка для цитирования:** Локтионова Е.А., Мифтахова Д.Р. Пропускная способность засоренных напорных трубопроводов // Инженерные исследования. 2022. №4 (9). С. 10-16. EDN: UEPVVP

## RELATIVE FLOW RATE OF CLOGGED PRESSURE PIPELINES

Е.А. Loktionova<sup>1</sup>, D.R. Miftakhova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

**Abstract.** The results of experimental studies of a pressure pipeline with artificial clogging are presented. The conclusion about the most significant reduction in throughput of pipelines in the first years of their operation are confirmed. The dependence diagram that allows to approximate the clogging degree with a known drop in flow rate in it during operation is obtained, this diagram also allows to find the limit clogging of the pipe, at which the liquid flow in the pipe is practically absent. The literature data of the decrease in pipeline throughput during operation in the zone of small diameters based on experiments with artificial clogging are expanded. The possibility of predicting changes in pipeline throughput based on studies with artificial clogging is shown.

**Keywords:** pressure pipeline, pipeline throughput, relative flow rate, clogging degree, operation period.

**For citation:** Loktionova E.A., Miftakhova D.R. Relative flow rate of clogged pressure pipelines // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.4 (9). Pp. 10-16. EDN: UEPVVP

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в период эксплуатации различных инженерных систем пропускная способность трубопроводов значительно снижается вследствие коррозии и образования отложений на их внутренней поверхности. Имеются исследования, подтверждающие изменение пропускной способности трубопровода с течением времени и описывающие негативные последствия образования отложений на стенках трубопроводов [1-6]. Однако, недостаточно изучен вопрос о возможности прогноза изменения гидравлических характеристик бывшего в эксплуатации трубопровода на основе универсальных, практически удобных критериев (коэффициента скорости, коэффициента гидравлического сопротивления, расхода).

Ранее авторами данной статьи был предложен переход от теории сопротивлений к теории фильтрации и, таким образом, к рассмотрению потока жидкости по трубопроводу с засорением в виде фильтрационного потока сквозь пористую среду [3, 4]. Данный переход обоснован тем, что коэффициенты фильтрации, в отличие от коэффициентов сопротивления, имеют размерность скорости, а также порядок значений, соизмеримый со скоростью в чистой трубе.

Цель работы: расширить имеющуюся в литературе оценку снижения пропускной способности трубопровода в процессе эксплуатации на область малых диаметров по данным опытов с искусственным засорением трубопровода.

Задачи работы: определить зависимость относительного расхода трубопровода от степени его засорения; сопоставить степень засорения трубопровода и продолжительность его эксплуатации.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения пропускной способности трубопроводов при увеличении их срока службы известны единичные исследования [2, 9], согласно которым относительная пропускная способность трубопроводов водоснабжения от длительности их эксплуатации, свойств транспортируемой воды и диаметра трубопровода выражается формулой:

$$Q/Q_0 = 1 - 0,01 \cdot n \cdot t^m, \quad (1)$$

где  $Q/Q_0$  – относительная пропускная способность трубопровода (отношение искомой пропускной способности к расчетной),  $t$  – продолжительность эксплуатации в годах,  $n$  и  $m$  – параметры, зависящие от физико-химических свойств транспортируемой воды [2].

Для трубопроводов водоснабжения, учитывая свойства воды образовывать отложения в трубопроводах, А.Г. Камерштейном предложено разбить природные воды на пять групп, каждая из которых определяет характер и интенсивность процесса понижения пропускной способности трубопровода. Группа I описывает случаи слабоминерализованных, некоррозионных воды, группа V – случаи сильно минерализованных, коррозионных вод. Параметры  $n$  и  $m$  различны для каждой из групп воды, а также изменяются с увеличением диаметра трубопровода. В таблице 1 представлены значения параметров  $n$  и  $m$  на основании табл. 2-1 из [2].

Таблица 1. Значения параметров  $n$  и  $m$  по данным [2]

Table 1. Values of parameters  $n$  and  $m$  according to the data [2]

Группа воды	Диаметр трубопровода $D$	Параметр $n$	Параметр $m$
I	150–300	4,4	0,5
	400–600	2,3	0,5
II	150–300	6,4	0,5
	400–600	2,3	0,5
III	150–300	11,6	0,4
	400–600	6,4	0,5
IV	150–300	18,0	0,35
	400–600	11,6	0,40
V	150–300	32,0	0,25
	400–600	18,0	0,35

Для оценки характера изменения пропускной способности трубопроводов с течением времени был построен график зависимости  $Q/Q_0 = f(t/t_{max})$  (рис. 1), который иллюстрирует изменение пропускной способности трубопровода при увеличении продолжительности его эксплуатации для групп воды

различного качества и трубопроводов различного диаметра (диапазоны 150–300 мм и 400–600 мм). Здесь  $t/t_{max}$  – отношение продолжительности эксплуатации трубопровода к максимально возможной продолжительности в реальных условиях, принято  $t_{max}=50$  лет.

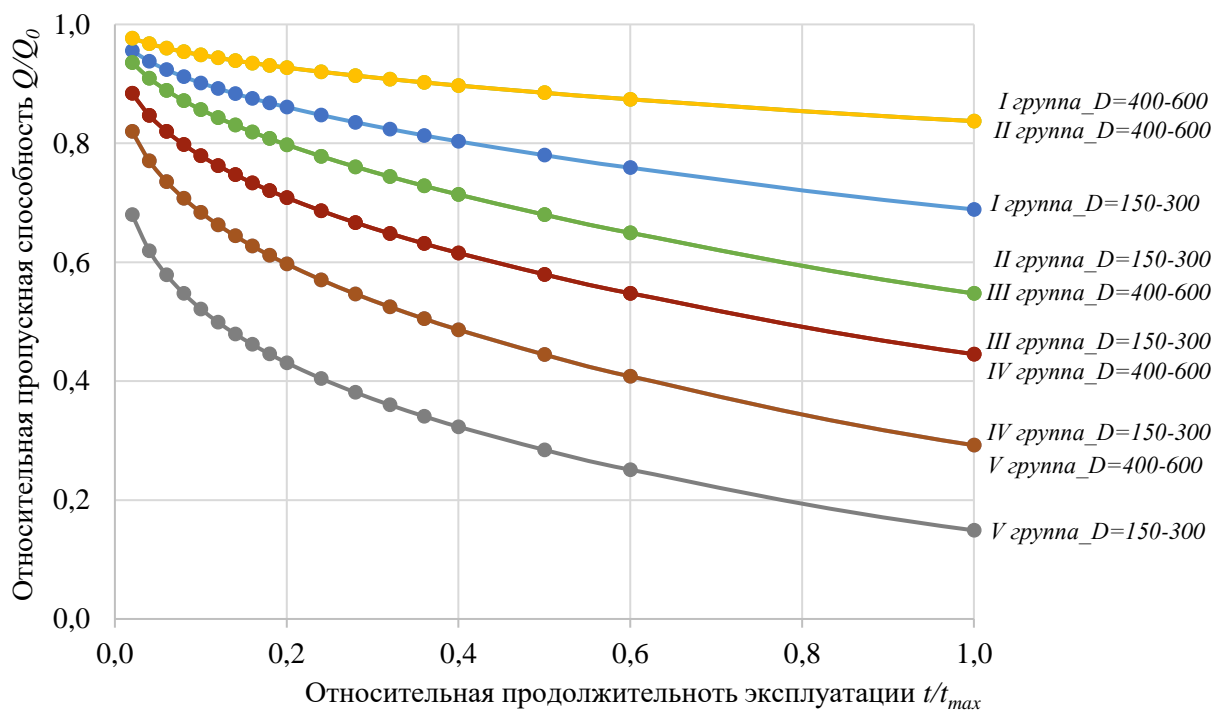


Рис. 1. График зависимости  $Q/Q_0 = f(t/t_{max})$  для групп воды I-V и двух диапазонов диаметров трубопроводов  
Fig. 1. Dependence diagram  $Q/Q_0 = f(t/t_{max})$  for water groups I-V and two ranges of pipeline diameters

График на рис. 1 показывает влияние качества воды на изменение пропускной способности трубопроводов и позволяет сделать следующие выводы:

1. При одинаковой продолжительности эксплуатации трубопровода и при транспортировании воды одного и того же качества относительная пропускная способность ниже для трубопроводов меньших диаметров.

2. С уменьшением диаметра трубопровода интенсивность снижения пропускной способности в ходе его эксплуатации возрастает.

3. Во всех приведенных случаях наиболее существенное изменение пропускной способности трубы имеет место в первые годы ее эксплуатации.

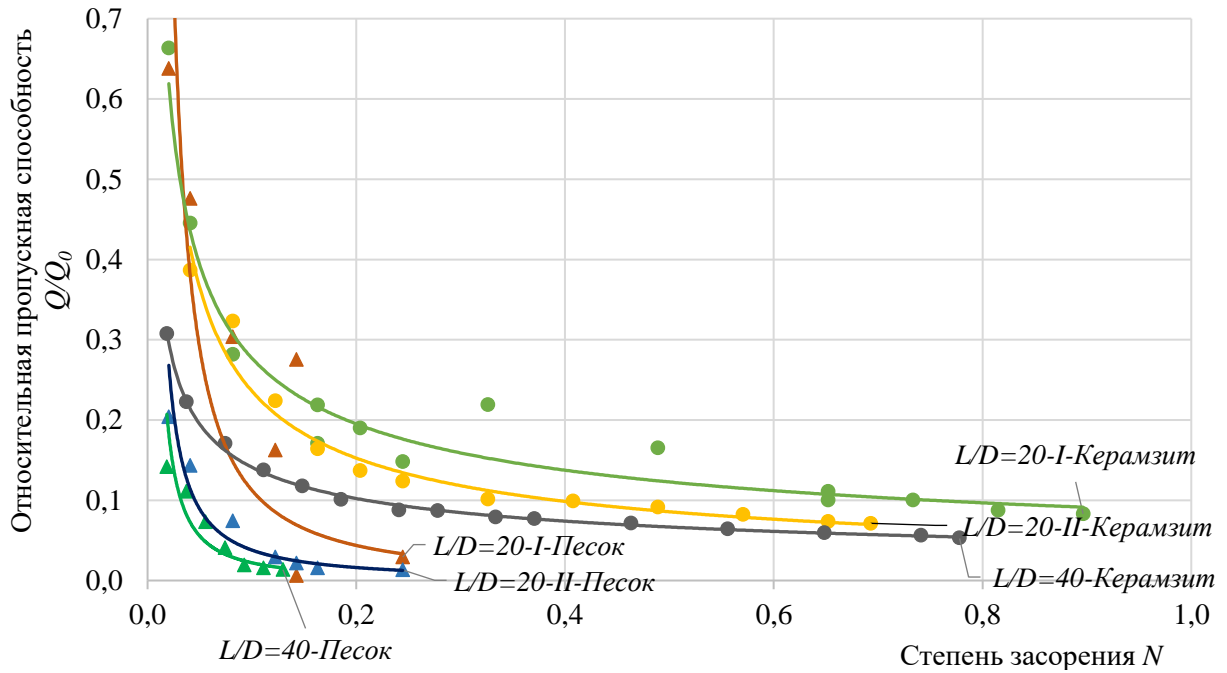
Таким образом, график иллюстрирует влияние диаметра трубопровода и качества транспортируемой воды на изменение пропускной способности трубопровода в процессе его эксплуатации.

Для исследования изменения пропускной способности трубопровода в ходе его эксплуатации авторами данной статьи были проведены серии опытов с имитацией засорения с помощью керамзита и песка для трубопроводов, отличающихся друг от друга отношением длины к внутреннему диаметру ( $L/D=20$  либо  $L/D=40$ ) и начальным гидравлическим сопротивлением.

Основным параметром, определяющим изменение пропускной способности исследованных участков, являлась степень их засорения (заполнения)  $N=V_{nan}/V_0$ , где  $V_{nan}$  – объем наполнителя,  $V_0$  – объем исследуемого участка трубы без наполнителя. В ходе эксперимента степень заполнения  $N$  принималась в диапазоне значений от 2% до 90% (или, в долях от целого – в диапазоне от 0,02 до 0,9).

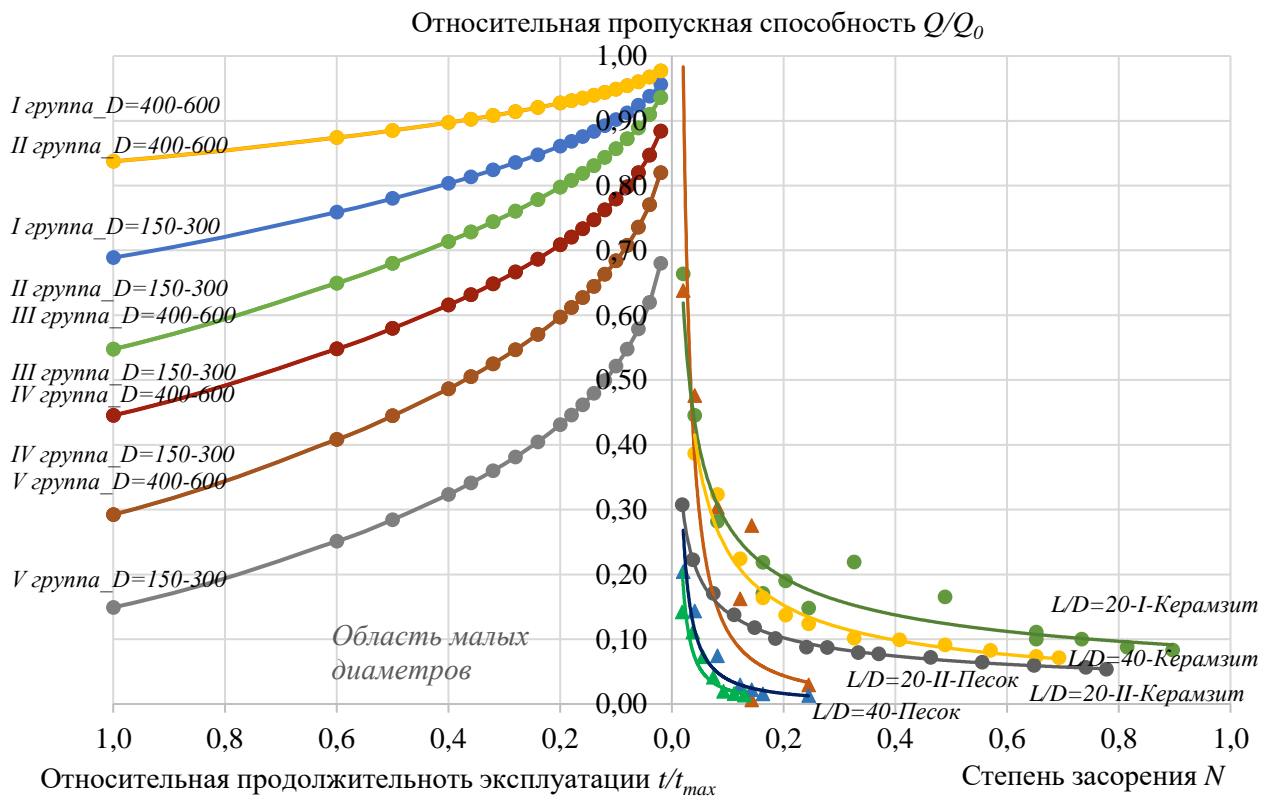
По результатам проведенных опытов был построен график зависимости  $Q/Q_0 = f(N)$  для участков трубы с разным соотношением  $L/D$  и наполнителем двух типов – керамзит и песок. Римская цифра в наименовании серии опытов обозначает начальное гидравлическое сопротивление трубопровода. Значение коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta_{нач-I}$  (в наименовании – I) выше значения  $\zeta_{нач-II}$  (в наименовании – II), что условно соответствует большему сроку эксплуатации.

График на рис. 2 показывает влияние типа наполнителя на изменение пропускной способности трубопровода при постоянном диаметре. Так же, как и отношение  $t/t_{max}$ , степень засорения  $N$  отражает продолжительность эксплуатации трубопровода, а два типа наполнителя имитируют различное качество воды. Опытные точки аппроксимированы осредненными степенными функциями.



**Рис. 2.** График зависимости  $Q/Q_0 = f(N)$   
**Fig. 2.** Dependence diagram  $Q/Q_0 = f(N)$

Для наглядности приведенные выше зависимости размещены на одном графике (рис. 3): на левой плоскости представлена зависимость  $Q/Q_0 = f(t/t_{max})$  и на правой плоскости – зависимость  $Q/Q_0 = f(N)$ .



**Рис. 3.** Совмещенный график зависимости  $Q/Q_0 = f(t/t_{max})$  и  $Q/Q_0 = f(N)$   
**Fig. 3.** Integrated dependence diagram  $Q/Q_0 = f(t/t_{max})$  и  $Q/Q_0 = f(N)$

Выводы, полученные на основании совмещенного графика (рис. 3):

1. Зависимости  $Q/Q_0=f(t/t_{max})$  и  $Q/Q_0=f(N)$  имеют качественно схожий вид кривых, что позволяет предпринять попытку распространения имеющихся в литературных источниках данных на область малых диаметров.

2. Полученное качественное соответствие между степенью засорения  $N$  и относительной продолжительностью эксплуатации трубопровода  $t/t_{max}$  свидетельствует о возможности прогнозирования снижения пропускной способности трубопровода путем исследования трубопровода с искусственным засорением.

3. Зависимость  $Q/Q_0=f(N)$  позволяет определять степень засорения трубопровода при известном падении расхода в нем.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

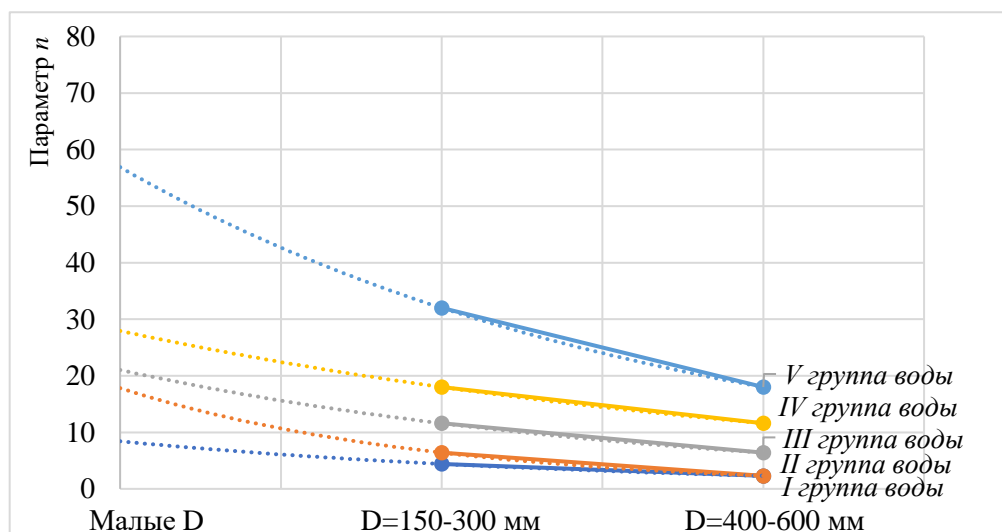
С целью расширения имеющихся данных в [2] и построения графика зависимости  $Q/Q_0=f(t)$  в области малых диаметров на основании проведенных опытов с засорением, необходимо найти выражение для времени эксплуатации  $t$  при условии, что значения функции  $Q/Q_0=f(N)$  известны. Приравняв правые части уравнений  $Q/Q_0=f(t)$  и  $Q/Q_0=f(N)$ , получаем выражение для времени эксплуатации  $t$

$$t = \sqrt[m]{\frac{1 - (Q/Q_0 = f(t))}{0,01 - n}} = \sqrt[m]{\frac{1 - f(N)}{0,01 - n}}. \quad (2)$$

Далее необходимо определить значения коэффициентов  $n$  и  $m$  (параметры, зависящие от физико-химических свойств транспортируемой воды) в случае расчета трубопроводов малых диаметров.

В связи с тем, что параметр  $m$  с изменением диаметра трубопровода изменяется мало, было принято для расчета использовать значения на основании данных [2, табл. 2-1] в зависимости от группы воды.

Для определения значения параметра  $n$  в области малых диаметров трубопроводов был построен график зависимости  $n=f(D)$  для диаметров трубопровода 150–300 мм и 400–600 мм и групп воды различного качества. Кривые были продолжены по экспоненциальной зависимости до пересечения с осью абсцисс, что соответствует области малых диаметров (рис. 4).



**Рис. 4.** График зависимости  $n=f(D)$  для определения параметра  $n$  в области малых диаметров трубопроводов  
**Fig. 4.** Dependence diagram  $n=f(D)$  for determining the parameter  $n$  in the area of small pipeline diameters

Полученные значения параметра  $n$  для малых диаметров трубопроводов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения параметра  $n$  для малых диаметров трубопроводов  
 Table 2. Values of parameter  $n$  for small pipeline diameters

Группа воды	Значение параметра $n$
I	8,5
II	18
III	21
IV	28
V	57

Таким образом, определены недостающие параметры уравнения (1) и имеется возможность построения графика  $Q/Q_0=f(t/t_{max})$  в области малых диаметров. Для определения времени эксплуатации при известном падении расхода воспользуемся формулой (2).

На рис. 5 представлен график зависимости снижения пропускной способности трубопровода от длительности его эксплуатации  $Q/Q_0=f(t)$  с учетом не только теоретических данных для больших диаметров (пунктирные линии), но и данных для малых диаметров (сплошные линии), полученных с помощью экспериментальных исследований с засорением.

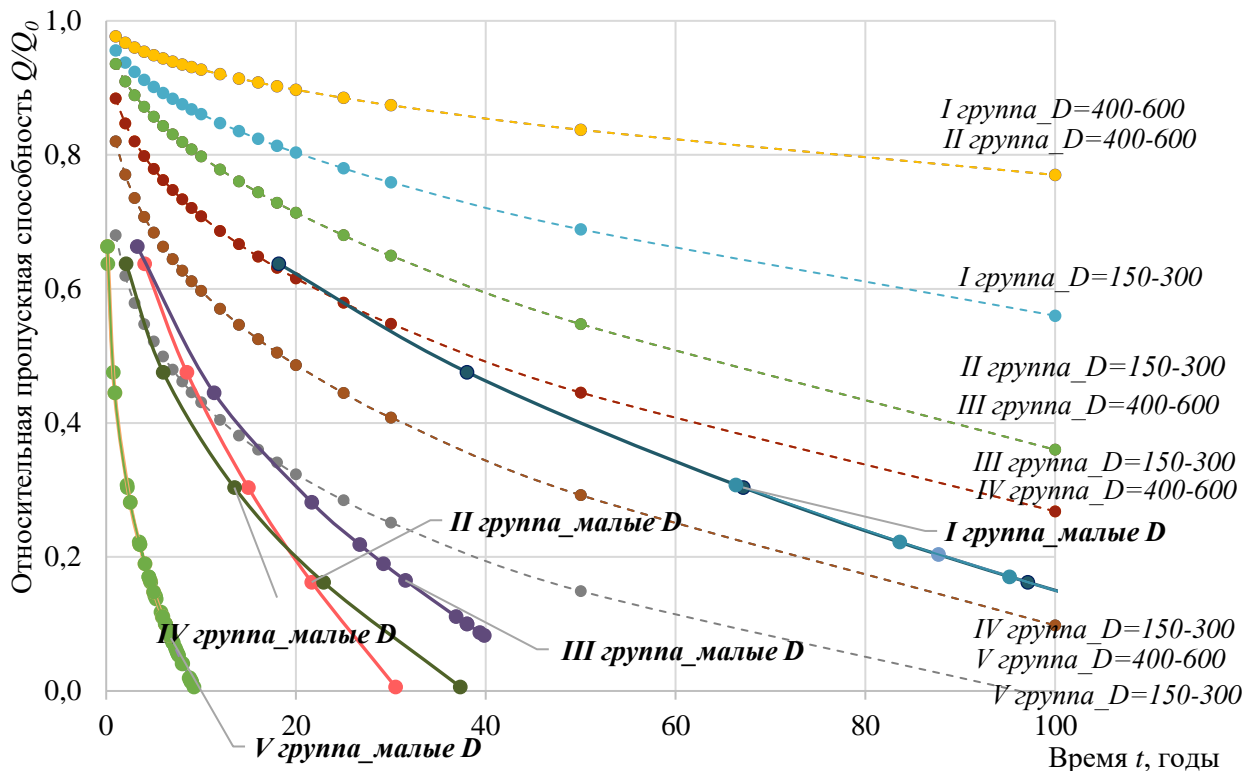


Рис. 5. График зависимости  $Q/Q_0=f(t)$   
Fig. 5. Dependence diagram  $Q/Q_0=f(t)$

Совмещенный график зависимости  $Q/Q_0=f(t/t_{max};N)$  на рис. 3 и график  $Q/Q_0=f(t)$  на рис. 5 дают наглядное представление об идентичности степени засорения трубопровода и относительной продолжительности его эксплуатации. Данный факт допускает возможность прогноза изменения пропускной способности трубопровода при увеличении его срока службы с помощью исследований влияния на пропускную способность искусственного засорения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Согласно имеющимся литературным источникам, пропускная способность трубопроводов наиболее существенно снижается в первые годы эксплуатации и незначительно – в последующие, что соответствует полученным в результате экспериментов опытным данным.

2. Зависимость  $Q/Q_0=f(N)$  позволяет приближенно определять степень засорения трубопровода при известном падении расхода в нем в процессе эксплуатации, а также находить предельное засорение трубы, при котором поток жидкости в трубе практически отсутствует.

3. График зависимости  $Q/Q_0=f(t)$ , полученный по результатам опытов и с использованием данных из литературных источников, говорит о возможности прогнозирования изменения пропускной способности трубопровода на основании исследований с искусственным засорением.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982. 224 с.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
3. Huang J., Shu L., Chen G. Zhang Y. Impact of Fouling on Flow-Induced Vibration Characteristics in Fluid-Conveying Pipelines. IEEE Access. 2016. Vol. 4. Pp. 6631–6644.

4. Datta S., Sarkar S. A review on different pipeline fault detection methods. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016.
5. Maliva R. Anthropogenic Aquifer Recharge. *WSP Methods in Water Resources Evaluation*. 2020. Series 5. 861 p.
6. Kabir G., Tesfamariam S. Sadiq and R 2015 Bayesian model averaging for the prediction of water main failure for small to large Canadian municipalities. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2015. Vol. 43. Pp. 233–240.
7. Локтионова Е.А., Мифтахова Д.Р. Фильтрация жидкости в засоренных напорных трубопроводах // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 8(76). С. 214-224. EDN: YSTENJ
8. Loktionova E., Miftakhova D., Yaroslavtseva E. Filtration characteristics of pressure pipelines previous being in operation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 883. 012014. DOI:10.1088/1757-899X/883/1/012014
9. Теплов А.В. О закономерностях напорного движения жидкости в трубах // *Теория подобия и ее применение в теплотехнике / Труды Моск. ин-та инж. ж.-д. транспорта. М., 1961. С. 72-78.*
10. Камерштейн А.Г. Мероприятия по сохранению пропускной способности водопроводных труб. М.: Стройиздат, 1950. 140 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Елена Анатольевна Локтионова** – доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: loktionova\_ea@spbstu.ru

**Динара Робертовна Мифтахова** – аспирант Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: dinara.miftakhova@gmail.com

#### ABOUT THE AUTHORS

**Elena A. Loktionova** – Ph.D., Associate Professor of Higher School of Hydraulic Engineering and Power Engineering. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: loktionova\_ea@spbstu.ru

**Dinara R. Miftakhova** – post-graduate student of Higher School of Hydraulic Engineering and Power Engineering. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: dinara.miftakhova@gmail.com