

УДК 621.644, 628.14

Гидравлические удары в напорных трубопроводах при надземной прокладке

О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Капинос О. Г., Твардовская Н. В. Гидравлические удары в напорных трубопроводах при надземной прокладке // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 79–90. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-79-90

Аннотация

Цель: Установить факторы, в наибольшей степени влияющие на риск возникновения гидравлических ударов в напорных трубопроводах. Определить скорости распространения фронта ударной волны. Провести расчеты параметров возможного гидравлического удара в зависимости от толщины стенки трубопровода. **Методы:** Метод характеристик, используемый для решения дифференциальных уравнений неустановившегося движения жидкости, положен в основу расчетной модели для определения параметров потока при возникновении гидравлических ударов. **Результаты:** На основе проведенных расчетов в статье анализируются диаграммы изменения давления в напорном трубопроводе из стальных труб. Производится оценка влияния скорости распространения волны гидравлического удара и скорости установившегося движения потока жидкости на характер протекания неустановившегося процесса и величину давления при гидравлическом ударе в напорном трубопроводе при надземной прокладке. Общие затраты на устранение аварийных ситуаций на напорных трубопроводах, особенно с учетом стоимости подготовки и очистки питьевой воды, всегда больше, чем заранее предусмотренные комплексные мероприятия, направленные на предотвращение негативных последствий возможных гидравлических ударов. **Практическая значимость:** Устранение последствий аварийных ситуаций, сопровождающихся утечкой воды, в суровых климатических условиях, при этом теплового влияния на грунты не всегда возможно избежать. Поэтому проектируя новые напорные системы и проводя реконструкцию существующих, необходимо учитывать возможные неустановившиеся процессы в напорных трубопроводах

Ключевые слова: Напорные трубопроводы, гидравлический удар, разрыв сплошности потока, проектирование, эксплуатация, надземная прокладка, стальные трубы, полимерные трубы.

Введение

Напорные трубопроводы — это один из элементов систем водоснабжения и водоотведения, без устойчивой и прогнозируемой работы которых снижается их эффективность в целом.

Практика эксплуатации доказала, что наиболее рациональный способ для суровых климатических условий — это надземная прокладка напорных трубопроводов.

Надземная прокладка трубопроводов по сравнению с другими способами при строительстве позволяет снизить объемы земляных работ и сократить затраты на мероприятия, направленные на предотвращение коррозии, вызываемой воздействием грунтов. При эксплуатации трубопроводы, проложенные надземным способом, проще осматривать в профилактических целях, они практически не оказывают теплового воздей-

ствия на грунты, и при таком способе значительно уменьшается время, необходимое для устранения возможных аварийных ситуаций [1, 2].

Выбирая надземный способ прокладки трубопроводов, нельзя забывать о недостатках и особенностях их устройства, которые необходимо учитывать при проектировании. При транспортировке воды увеличиваются потери тепла, и, следовательно, требуется усиленная и дорогостоящая теплоизоляция. Однако с развитием производства современных материалов появляются новые, более эффективные, экономически обоснованные теплоизоляционные технологии [3]. Надземная прокладка предъявляет особые требования к опорам, которые не должны приводить к тепловой нагрузке на грунт. Такой тип прокладки трубопроводов рекомендуется вне территории населенных пунктов во избежание ее загромождения.

В качестве материала труб в таких условиях обычно используется сталь или полимерные материалы. Трубопроводы из чугуна, железобетона или бетона требуют сложного стыкового соединения участков труб и поэтому не рекомендуются к использованию. Муфтовые и раструбные соединения при отрицательных температурах производить затруднительно.

Надземная прокладка трубопроводов требует компенсации напряжений, возникающих в стальных и полимерных трубах при изменении наружной температуры. В случае опорожнения или заполнения трубопроводов в зимний период температура стенок труб резко изменяется и возникают наиболее опасные температурные деформации труб. Для компенсации температурных деформаций применяют прямолинейную прокладку со специальными приспособлениями и зигзагообразную прокладку на специальных опорах для самокомпенсации.

Гидравлический удар как один из видов неустановившегося процесса может возникать при

эксплуатации любой напорной трубопроводной системы. Взаимосвязь параметров гидравлических ударов и материала, из которого изготавливаются трубопроводы, рассматривается на всем протяжении истории изучения неустановившихся процессов для решения практических задач [2, 4–8].

Для подбора противоударного оборудования и выбора способа защиты насосных установок с целью предотвращения гидравлических ударов с катастрофическими последствиями необходимо еще на этапе проектирования рассчитывать величину давления, превышающего рабочее давление в различных точках напорного трубопровода, скорости движения воды при волновом процессе и определять места и величину возникновения вакуумметрического давления в системе. Большинство современных методик расчета основывается на численном методе с использованием «метода характеристик» [7–11].

Трубопроводные системы из стальных труб в среднем служат около 25–30 лет. Системы транспортировки воды, введенные в эксплуатацию при освоении территорий России в прошлом веке, постепенно приходят в полную негодность и требуют соответствующей реконструкции [12].

Актуальность данного исследования заключается в том, что существует потребность в реконструкции и развитии напорных систем, проложенных надземным способом. В современных условиях есть возможность выбирать трассу водовода, материал труб, способ их соединения, противоударное оборудование на основе всестороннего расчета с учетом возможности возникновения гидравлического удара.

Целью исследования было установить факторы, увеличивающие риск возникновения гидравлических ударов в напорных трубопроводах при надземной прокладке. При проведении исследования решались следующие задачи:

- анализировалось влияние материала труб на скорость распространения фронта волны гидравлического удара;
- исследовалось влияние толщины стенки стальной трубы на величину скорости ударной волны и величину максимального давления по всей длине при гидравлическом ударе;
- определялись параметры гидравлического удара при различных начальных скоростях движения жидкости на основе современных расчетных методов;
- приведены пути снижения рисков возникновения разрушительных неустановившихся процессов в трубопроводах при надземной прокладке.

Методы и материалы

Предметом исследования являлся гидравлический удар в напорных трубопроводах при надземной прокладке.

Для решения поставленных задач и достижения конечной цели работы последовательно применялись теоретический, общепрофильный анализ и синтез, наблюдение и моделирование.

В работе проводилась оценка воздействия скорости распространения ударной волны, начальной скорости движения жидкости и профиля прокладки на возможность возникновения разрывов сплошности потока жидкости в процессе гидравлического удара в напорных трубопроводах.

Неустановившиеся процессы движения жидкости моделировались в стальном трубопроводе с утолщенными стенками и внутренним диаметром 82 мм [6]. Прокладка водовода осуществлялась надземная на опорах, а соединение участков труб было выполнено на сварке, арматура монтировалась с помощью фланцев. Общая протяженность трубопровода составила 171 метр, а разность высот равномерного подъема от начальной до конечной точки не превысила 41 метр. При гидравлическом ударе, вызванном резким пере-

крытием задвижки в течение 0,05 с, величина скорости распространения ударной волны составила 1250 м/с, максимальная величина вакуумметрического давления не превысила 8 м вод. ст.

Метод анализа бесконечно малых величин и метод характеристик для одномерного волнового уравнения выбраны как основа для разработанной расчетной методики параметров гидравлического удара с достаточной для решения практических задач точностью.

Результаты исследования

В напорных трубах при гидравлическом ударе возникает фронт распространения ударной волны, скорость которого достигает наибольших величин в стальных трубах по сравнению с другими материалами труб. Большая скорость распространения волнового процесса может способствовать образованию разрывов сплошности потока жидкости у регулирующего органа (задвижки, насоса, обратного клапана и других), а также на участках изменения уклона водовода в возвышенных точках профиля. Разрыв сплошности потока происходит вследствие понижения давления в трубопроводе ниже атмосферного до вакуумметрического. Сначала поток жидкости отходит от места разрыва сплошности потока, а затем движется в обратном направлении с возрастающей скоростью, что приводит к схлопыванию разрыва. Вследствие интерференции волн происходит возрастание максимального ударного давления, которое по величине превосходит рабочее давление при установившемся процессе.

При расчетах на гидравлический удар важной характеристикой процесса является скорость распространения фронта ударной волны c , м/с. Ее величину можно определить по формуле Д. Кортвега, предложенной для использования основоположником теории гидравлического удара Н. Е. Жуковским [9]:

ТАБЛИЦА 1. Значение скорости распространения фронта ударной волны в стальных трубах с учетом отношения наружного диаметра трубы D_n к толщине стенки s

Скорость распространения фронта ударной волны c , м/с	Виды стальных труб			
	особотонкостенные	тонкостенные	толстостенные	особотолстостенные
	$\frac{D_n}{s} > 40$	$\frac{D_n}{s} = 12,5 : 40$	$\frac{D_n}{s} = 6 : 12,5$	$\frac{D_n}{s} < 6$
	926,3–1219,0	1221,5–1365,1	1365,7–1410,5	1407,9–1419,7

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E \cdot D}{E_D \cdot \delta}}} = \frac{1435}{\sqrt{1 + \frac{E \cdot D}{E_D \cdot s}}}, \quad (1)$$

где E — модуль объемной упругости перекачиваемой жидкости, Па; для воды при атмосферном давлении и температуре до 20 °С, $E = 206 \cdot 10^7$ Па;

ρ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²;

D — внутренний диаметр трубопровода, мм;

E_D — модуль упругой деформации материала труб, Па; для стали $E_D = 206 \cdot 10^9$ Па;

s — толщина стенки трубопровода, мм.

Согласно ГОСТ 8734—75 [13] в зависимости от отношения диаметра к толщине стенки трубы различают: особотолстостенные, толстостенные, тонкостенные и особотонкостенные. На первый взгляд, кажется, что чем больше толщина стенки трубы s , тем лучше трубопровод из таких труб противостоит гидравлическому удару. Наряду с преимуществами (выдерживают динамические нагрузки без потери прочности длительное время, рассчитаны на большие рабочие давления) у толстостенных труб есть и недостатки (в них быстрее распространяются волны изменения давления при гидравлических ударах, и поэтому значения максимального давления при таких явлениях могут быть значительнее).

В табл. 1 приведены значения скорости распространения фронта ударной волны, рассчитанной по формуле (1) для различных видов стальных труб, выпускаемых по ГОСТ 8734—75 [13] и ГОСТ 10704—91 [14]. Эти данные показывают, что с увеличением толстостенности трубы величина c возрастает в стальных трубах почти на 50 %, при этом для толстостенных и особотолстостенных труб скорость c имеет максимальные значения и мало зависит от соотношения D_n/s (разница в значениях не превышает 5 %).

Пластмассовые трубы в целом характеризуются значительно меньшим значением модуля упругой деформации материала труб, численное значение которого зависит от вида полимерного материала и указывается производителем. Следовательно, в соответствии с формулой (1) скорость распространения ударной волны в таких трубах не превосходит 900 м/с и обычно находится в пределах от 200 до 600 м/с. При этом для надземной прокладки трубопроводов из полимерных материалов нет необходимости учитывать упругий отпор грунта, который зачастую значительно увеличивает скорость распространения ударной волны [10].

Без учета волнового характера распространения гидравлического удара при первичном рассмотрении может показаться, что такие низкие скорости распространения волны гидравлического удара способствуют снижению значений максимальных давлений в трубопроводах из полимерных материалов. В водоводах, имеющих значительный подъем от регулирующего органа с последующими точками перелома профиля маги-

страли, несмотря на низкую скорость ударной волны, могут возникать гидравлические удары с разрывами сплошности потока, которые существуют продолжительный период времени как в точках перелома, так и у регулирующего органа. Негативным последствием таких гидравлических ударов является не только появление давлений большей величины, но и значительные разрывы сплошности потока жидкости в трубопроводах. Возникновение в трубопроводах из полимерных материалов таких разрывов потока с понижением давления до вакуумметрического негативно сказывается на прочностных характеристиках самих труб и их стыковых соединений.

Проследить влияние величин скорости распространения волны гидравлического удара и начальной скорости движения жидкости при установившемся режиме на давление при гидравлическом ударе можно по формуле Н. Е. Жуковского [9]. В случае полной остановки системы и прекращения движения жидкости в трубопроводе формула имеет вид:

$$H = H_0 + \frac{c \cdot V_0}{g}, \quad (2)$$

где H — напор в процессе гидравлического удара, м;

H_0 — напор при установившемся движении жидкости в трубопроводе, м;

c — скорость распространения волны гидравлического удара, м/с;

V_0 — начальная скорость движения жидкости в трубопроводе при установившемся режиме, м/с;

g — ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Формула (2) не учитывает многочисленные факторы, влияющие на процесс протекания гидравлического удара, имеющего волновой характер распространения, такие как: профиль

прокладки трубопровода, время срабатывания регулирующего органа, вид установленного оборудования, изменение диаметра и материала трубопровода на различных участках сети. Методика расчета параметров неустановившегося процесса, основанная на методе характеристик, позволяет учесть эти особенности.

Воспользовавшись известными дифференциальными уравнениями неустановившегося движения [7–11] и преобразовав их с помощью метода характеристик, можно составить модель гидравлического удара, учитывающую особенности всей трубопроводной системы и позволяющую определять ее параметры в любой расчетной точке и в каждый момент времени.

Особенностью гидравлического удара в трубопроводе с восходящим продольным профилем является то, что с увеличением начальной скорости движения жидкости при установившемся режиме возрастает вероятность возникновения разрывов сплошности потока жидкости у регулирующего органа в начале водовода. При схлопывании кавитационных полостей образуются новые волны давления, которые в результате интерференции волн вызывают резкое увеличение давления. Схлопывание длительно существующих разрывов сплошности потока жидкости способствует появлению обратной скорости течения жидкости, превышающей ее начальное значение при установившемся процессе.

Данные процессы можно наглядно проследить по значениям давления, проявляющимся как в первом, так и во втором повышении давления, которые рассчитаны и сравниваются с экспериментальными данными в табл. 2.

Сопоставление экспериментальных значений и расчетных данных, полученных авторами, показывает их хорошую сходимость, так как максимальная величина погрешности составляет 12,1 % и величина средней относительной погрешности — 4,6 %.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение величины максимального давления от начальной скорости движения жидкости

Начальная скорость движения воды, м/с	Первое повышение напора			Второе повышение напора		
	значения напора, м		относительная погрешность, %	значения напора, м		относительная погрешность, %
	эксперимент	расчет		эксперимент	расчет	
0,18	65	62,0	4,8	60	61,8	2,9
0,36	80	77,5	3,2	66	74,7	11,6
0,4	90	82,8	8,7	79	78,1	1,4
0,5	116	116,9	0,8	90	85,8	5,0
0,6	132	134,2	1,6	105	100,8	4,2
0,8	160	172,8	7,4	135	134,6	0,3
1,0	182	191,7	5,1	170	163,3	4,1
1,06	165	188,4	12,1	168	170,6	1,5
1,2	175	195,5	10,5	210	218,8	4,0
1,25	200	207,9	3,8	215	217,4	1,1
1,4	218	235,1	7,3	215	211,5	1,7
1,5	220	238,2	7,6	245	217,0	12,0
1,63	247	247,6	0,3	250	247,2	1,1
1,7	230	250,0	8	250	250,0	0
1,82	265	269,7	1,7	230	255,3	9,9
2,0	285	292,0	2,4	290	289,6	0,1

Величина начальной скорости движения жидкости влияет не только на возрастание величины ударного давления. Можно проследить по значениям, представленным в табл. 2, что с увеличением численного значения начальной скорости движения меняется и период гидравлического удара, в котором наблюдаются максимальные значения ударного давления. Для начальных скоростей более 1 м/с характерно появление максимального ударного давления во второй фазе гидравлического удара.

Диаграммы на рис. 1 и 2 наглядно показывают изменение давления во времени в процессе гидравлического удара, вызываемого быстрым закрытием задвижки в начале трубопровода по направлению начального движения воды. В зависимости от начальной скорости движения воды меняется и величина максимального ударного давления, и характер протекания всего процесса гидроудара в целом. Например, на рис. 1 ($V_0 = 0,6$ м/с) и на опытной диаграмме, и на расчетном графике отчет-

ливо видна картина падения давления у регулирующего органа ниже атмосферного.

В первой фазе гидравлического удара на опытной диаграмме можно проследить высокочастотные колебания давления, что свидетельствует о возникновении по всей длине потока мелких кавитационных пузырьков. Однако само понижение давления ниже атмосферного длится не более 0,3 с, значит, крупных кавитационных пустот (разрывов сплошности потока) не образуется. Расчетная диаграмма описывает кратковременное понижение давления с образованием небольших кавитационных пустот.

Диаграммы на рис. 2 при начальной скорости около $V_0 = 1,1$ м/с отличаются от рассмотренных выше большей продолжительностью существования в трубопроводе давления ниже атмосферного.

В следующую фазу гидравлического удара давление возрастает быстрее и держится у максимальных величин более продолжительное время. Подобный характер изменения давления свиде-

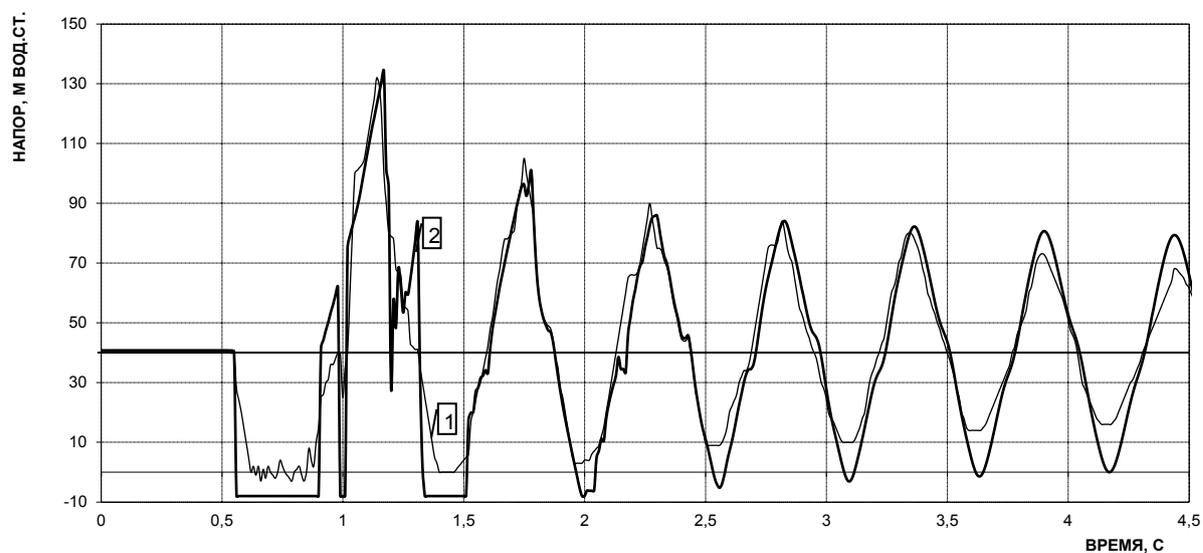


Рис. 1. Графики изменения давления у задвижки при $V_0 = 0,6$ м/с:
1 — график, построенный по экспериментальным данным [6];
2 — график, полученный по расчетным значениям

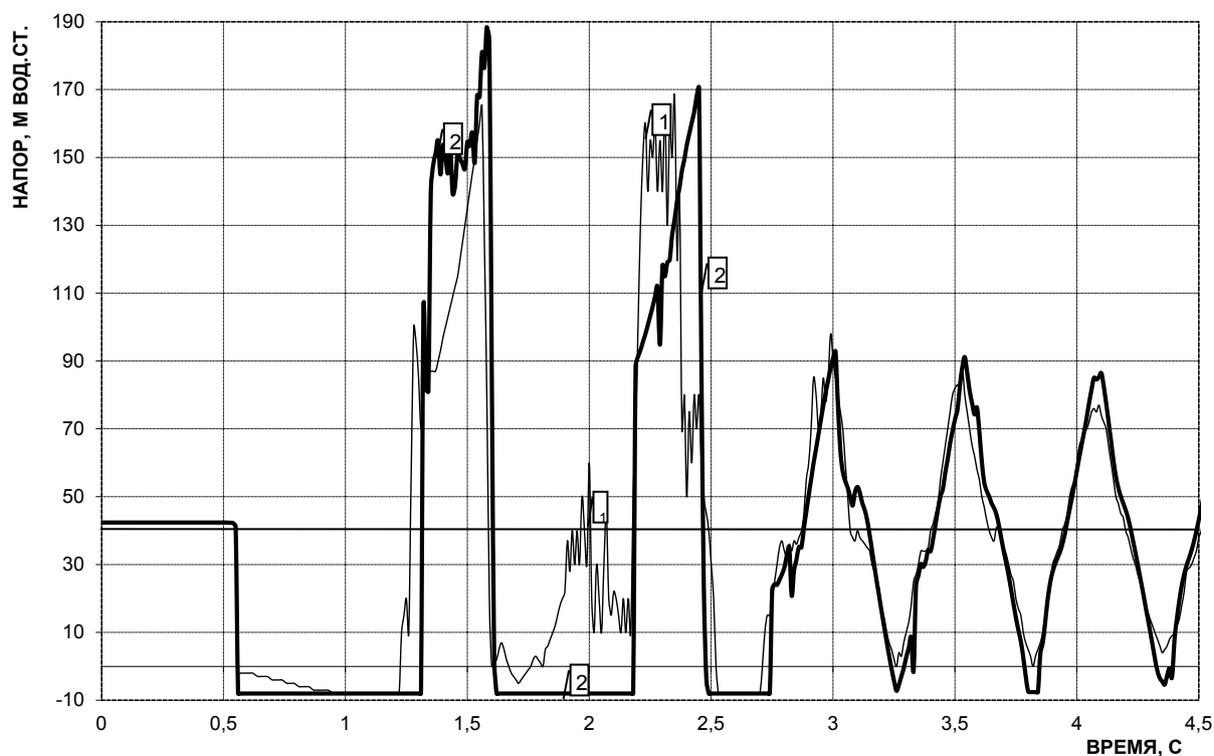


Рис. 2. Графики изменения давления у задвижки при $V_0 = 1,1$ м/с:
1 — график, построенный по экспериментальным данным [6];
2 — график, полученный по расчетным значениям

тельствует о возникновении существенного разрыва сплошности потока у задвижки при первом снижении давления. В последующие фазы происходит затухание процесса, которое сопровождается уменьшением скорости движения жидкости, поэтому снижение давления ниже атмосферного в последующих фазах гидравлического удара приводит в первую очередь к образованию мелких кавитационных полостей по всему трубопроводу. Разрывы сплошности потока жидкости незначительны и проявляются кратковременно.

Использование данной методики расчета позволяет учесть факторы, влияющие на процесс гидравлического удара, и построить диаграммы изменения давления в любой точке напорного трубопровода.

Для снижения вероятности возникновения катастрофических проявлений гидравлического удара необходимо в первую очередь провести полноценный расчет всей напорной системы. На основе полученных результатов расчета и диаграмм изменения давления в различных характерных точках сети требуется при необходимости подбирать мероприятия и оборудование для снижения последствий гидравлических ударов. Затем желательно провести поверочный расчет моделируемого неустановившегося процесса с учетом противоударных мероприятий и оценить эффективность принятых решений.

Обсуждение

В современных условиях при надземной прокладке напорных трубопроводов для заказчиков в приоритете остаются стальные трубы. При проектировании и реконструкции необходимо учитывать, что увеличение толщины стенки трубы не снижает вероятность возникновения гидравлических ударов. Однако, если открыть соответствующий типу производства стальных труб ГОСТ, можно увидеть, что теоретическая масса 1 м трубы для одного и того же диаметра, но разной

толщины стенки отличается в разы. Очевидно, что стоимость труб с увеличением толщины стенки также значительно возрастает, и более тяжелые трубы требуют усиленных опор при надземной прокладке. С точки зрения противодействия негативным последствиям гидравлического удара в водопроводных напорных трубах применение особотолстостенных или толстостенных труб оправдано только рабочим давлением установившегося движения жидкости, требующим использования таких высокопрочных труб.

Скорость установившегося движения потока жидкости, как видно из экспериментов и расчетных данных, напрямую влияет на процесс протекания гидравлического удара. При эксплуатации трубопроводов из разных материалов известно, что со временем внутренний диаметр труб уменьшается за счет наличия отложений в трубах. Толщина внутренних отложений труб, находящихся в эксплуатации более десяти лет, достигает больших значений. С учетом подогрева транспортируемой воды при низких температурах окружающего воздуха процесс нарастания отложений внутри трубы идет более активно. Фактическая скорость потока за счет сужения поперечного сечения возрастает на 30–50 % [15].

Для снижения рисков возникновения гидравлического удара в напорных трубопроводах при надземной прокладке необходимо проводить расчет трубопровода на возможность возникновения неустановившегося процесса в широком диапазоне скоростей движения потока воды при установившемся режиме. В соответствии с результатами расчета, в случае возникновения при моделировании процесса гидроудара значений давления, многократно превышающих величину давления при установившемся процессе, можно даже рассмотреть изменение трассы прокладки системы трубопроводов для исключения участков с резким подъемом.

Необходимо направлять усилия на предотвращение появления гидравлического удара еще на

стадии проектирования напорной системы, а не бороться с его последствиями, особенно в сложных климатических условиях. Изменение трассы трубопровода, снижение скорости движения воды при установившемся процессе, приводящее к увеличению диаметров трубопроводов, — это дорогостоящие мероприятия, но долгосрочный эффект надежности и безаварийной работы системы в целом более ценен.

Противоударная защита должна основываться на расчетных значениях давлений в трубопроводе и включать в себя разносторонние мероприятия для предотвращения не только разрывов трубопроводов, но и длительных снижений давления ниже атмосферного, исключаящих развитие обратных скоростей движения воды значительной величины.

Заключение

Проведенные расчеты показывают, что увеличение толщины стенки стальной трубы не приводит к снижению значения скорости распространения фронта ударной волны и, следовательно, не ведет к снижению величины возникающего максимального давления при гидравлических ударах. С другой стороны, низкие значения скоростей распространения волны давления в трубах из полимерных материалов не гарантируют невозможности возникновения ударов, сопровождающихся разрывами сплошности потока жидкости, которые также сопровождаются высокими величинами ударного давления.

Снижение скорости движения жидкости при установившемся режиме в напорной системе и определение оптимального диапазона скоростей для проектируемого трубопровода способствуют снижению риска возникновения катастрофических проявлений возможного гидравлического удара.

Моделирование процесса с использованием метода характеристик позволяет проводить

расчеты параметров гидравлического удара в напорном трубопроводе при надземной прокладке с достаточной точностью, тем самым способствуя выбору наиболее эффективных и достаточных мероприятий по снижению рисков возникновения разрушительных неустановившихся процессов.

Библиографический список

1. Terekhov L. D. Experimental study of soil thawing around shallow sewage pipelines in winter / L. D. Terekhov, S. B. Mayny, N. A. Chernikov // *Water and Ecology*. — 2019. — Iss. 24(4). Pp. 71–78. — DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.71-78.
2. Дикаревский В. С. Напорные водоводы железнодорожного водоснабжения / В.С. Дикаревский, И. И. Красноярский. — М.: Транспорт, 1978. — 360 с.
3. Petrova T. M. Geotechnical problems of transport construction and their solutions / T. M. Petrova, E. Y. Chistyakov // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations — Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019*. — 2019. — Pp. 250–253. — DOI: 10.1201/9780429058882-49.
4. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. — М.-Л.: ГИТТЛ, 1949. — 104 с.
5. Мошнин Л. Ф. Расчеты гидравлического удара / Л. Ф. Мошнин, Е. Т. Тимофеева. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952. — 200 с.
6. Смирнов Д. Н. Гидравлический удар в напорных водоводах / Д. Н. Смирнов, Л. Б. Зубов. — М.: Стройиздат, 1975. — 122 с.
7. Дикаревский В. С. Гидравлический удар в напорных трубопроводах водоотведения / В. С. Дикаревский, О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // *Вестник РААСН*. — 2004. — Вып. 8. — С. 152–156.
8. Людеке Х.-Й. Гидроудар: причины, анализ и способы предотвращения / Х.-Й. Людеке, Б. Котэ, К. Паули //

Водоснабжение и санитарная техника. — 2015. — № 8. — С. 62–69.

9. Капинос О. Г. Учет разрывов сплошности потока при гидравлических ударах на этапе проектирования напорных трубопроводов из полимерных материалов / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 116–126.

10. Капинос О. Г. Последствия гидравлических ударов, сопровождающихся разрывами сплошности потока жидкости / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2011. — Вып. 3(28). — С. 167–176.

11. Капинос О. Г. Влияние выбранного материала труб на величину давления в трубопроводе при возможном гидравлическом ударе / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2008. — № 2(15). — С. 112–119.

12. Терехов Л. Д. Проблемы изношенных трубопроводов Дальнего Востока России и пути их восстановления / Л. Д. Терехов, Н. В. Твардовская, А. В. Федорчук и др. // Яковлевские чтения — 2022: Системы водоснабжения и водоотведения. Современные проблемы и решения. Сборник докладов участников XVII Международной

научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С. В. Яковлева. — М., 2022. — С. 54–61.

13. ГОСТ 8734—75. Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. — М., 1996. — 20 с.

14. ГОСТ 10704—91. Трубы стальные электросварные прямошовные. — М., 2007. — 12 с.

15. Продоус О. А. Техническое регулирование значений гидравлических параметров неновых металлических труб для продления периода их использования / О. А. Продоус, Л. Д. Терехов, П. П. Якубчик и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 3. — С. 421–427.

Дата поступления: 07.02.2023

Решение о публикации: 01.03.2023

Контактная информация:

КАПИНОС Ольга Геннадьевна — канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; olk1975@mail.ru

ТВАРДОВСКАЯ Надежда Владимировна —

канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой

«Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»;

tvardovskaya@pgups.ru

Hydraulic Hits in Penstocks with Above-Ground Laying

O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaya

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. Hydraulic Hits in Penstocks with Above-Ground Laying // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 79–90. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-79-90

Summary

Purpose: To determine the factors having the biggest impact on the risk of water hammer occurrence in above-ground laying of pipeline which's rational for severe climate conditions. To define the velocities of hammer wave front propagation in steel pipes for their different types and to compare with the values for polythene pipes. To pursue the calculation of parameters of possible water hammer, depending on pipeline wall thickness. **Methods:** Method of characteristics, used for solving differential equations of liquid unsteady motion, laid at the basis of calculation model for flow parameter definition at water hammer occurrence. **Results:** On the basis of calculations carried out in the article, the diagrams of pressure changes

in pressure pipeline, made of steel pipes. are analyzed. Impact assessment of water hammer wave speed propagation and of liquid flow steady-state motion speed on unsteady process flow character and pressure value at water hammer in pressure pipeline in above-ground laying is pursued. Common expenditures on the elimination of emergency situations on pressure pipelines, especially given the cost of drinking water preparation and purification, are always bigger than preliminary provided complex measures aimed at the elimination of possible water hammer negative consequences. **Practical significance:** Above-ground laying way of pipelines dictates the use of pipes from particular materials. Steel and polythene pipes, applied in this case, demonstrate special characteristics which should be considered at the projection of appearance possibility of water hit and its consequences. Elimination of emergency situation consequences, accompanied by water leakage, is complicated especially in severe climate conditions, meanwhile, thermal impact on soils is not always avoidable. Therefore, when projecting new pressure systems and reconstructing existing ones it is necessary to take into account possible unsteady processes in pressure pipelines.

Keywords: pressure pipelines, water hammer, flow continuity gap, projection, operation, severe climate conditions, above-ground laying, steel pipes, polymer pipes.

References

1. Terekhov L. D., Mayny S. B., Chernikov N. A. Experimental study of soil thawing around shallow sewage pipelines in winter. *Water and Ecology*, 2019, Iss. 24(4), pp. 71–78. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.71-78.
2. Dikarevskij V. S., Krasnyansky I. I. *Napornye vodovody zheleznodorozhnogo vodosnabzheniya* [Pressure water pipelines for railway water supply]. Moscow: Transport Publ., 1978, 360 p. (In Russian)
3. Petrova T. M., Chistyakov E. Y. Geotechnical problems of transport construction and their solutions. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations — Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019, 2019*, pp. 250–253. DOI: 10.1201/9780429058882-49.
4. Zhukovskij N. E. *O gidravlicheskom udare v vodoprovodnyh trubah* [On hydraulic shock in water pipes]. M.-L.: GITTL Publ., 1949, 104 p. (In Russian)
5. Moshnin L. F., Timofeeva E. T. *Raschety gidravlichesкого удара* [Calculations of hydraulic shock]. M.; L.: Gosenergoizdat, 1952, 200 p. (In Russian)
6. Smirnov D. N., Zubov L. B. *Gidravlicheskiy udar v napornyh vodovodah* [Hydraulic shock in pressure conduits]. Moscow: Strojizdat Publ., 1975, 122 p. (In Russian)
7. Dikarevskij V. S., Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. *Gidravlicheskiy udar v napornyh truboprovodah vodootvedeniya* [Hydraulic shock in pressure sewerage pipelines]. *Vestnik RAASN* [Vestnik RAASN]. 2004, vol. 8, pp. 152–156. (In Russian)
8. Lyudeke H.-J., Kote B., Pauli K. *Gidroudar: prichiny, analiz i sposoby predotvrashcheniya* [Water hammer: causes, analysis and ways to prevent]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering]. 2015, Iss. 8, pp. 62–69. (In Russian)
9. Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. *Uchet razryvov sploshnosti potoka pri gidravlicheskiх udarakh na etape proektirovaniya napornykh truboprovodov iz polimernykh materialov* [Accounting for Flow Discontinuities While Water Hammers at Engineering Stage of Pressure Pipelines Made of Polymeric Materials]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, vol. 19, Iss. 1, pp. 116–126. (In Russian)
10. Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. *Posledstviya gidravlicheskiх udarov, soprovozhdayushchihsya razryvami sploshnosti potoka zhidkosti* [Effects/Consequences of Water Hammer Accompanied by the Interruption of FluidFlow Discontinuity]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2011, Iss. 3(28), pp. 167–176. (In Russian)
11. Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. *Vliyanie vybrannogo materiala trub na velichinu davleniya v truboprovode pri vozmozhnom gidravlicheskom udare* [Influence of the Selected Pipe Material on the Pressure Value in a Pipeline at a Possible

Hydraulic Hammer]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2008, Iss. 2(15), pp. 112–119. (In Russian)

12. Terekhov L. D., Tvardovskaya N. V., Fedorchuk A. V. et al. Problemy iznoshennykh truboprovodov Dal'nego Vostoka Rossii i puti ikh vosstanovleniya [Problems of worn-out pipelines of the Russian Far East and ways of their restoration]. *Yakovlevskie chteniya — 2022: Sistemy vodosnabzheniya i vodootvedeniya. Sovremennye problemy i resheniya. Sbornik dokladov uchastnikov XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati akademika RAN S. V. Yakovleva* [Yakovlev readings — 2022: Water supply and sanitation systems. Modern problems and solutions. Collection of reports of participants of the XVII International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Sciences S. V. Yakovlev]. Moscow, 2022. pp. 54–61. (In Russian)

13. GOST 8734—75. *Truby stal'nye besshovnye kholodnodeformirovannye* [GOST 8734—75. Seamless cold-deformed steel pipes]. Moscow, 1996, 20 p. (In Russian)

14. GOST 10704—91. *Truby stal'nye elektrovarnye pryamoshovnye* [GOST 10704—91. Electric-welded steel straight-seamed pipes]. Moscow, 2007, 12 p. (In Russian)

15. Prodous O. A. Terekhov L. D., Yakubchik P. P. et al. Tekhnicheskoe regulirovanie znacheniy gidravlicheskih parametrov nenovykh metallicheskih trub dlya prodleniya perioda ikh ispol'zovaniya [Technical regulation of values of hydraulic parameters of non-wood metal pipes to extend their period of use]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, Iss. 3, pp. 421–427. (In Russian)

Received: February 07, 2023

Accepted: March 01, 2023

Author's information:

Olga G. KAPINOS — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of “Water Supply, Sewerage and Hydraulics”; olk1975@mail.ru

Nadezhda V. TVARDOVSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of “Water Supply, Sewerage and Hydraulics”; tvardovskaya@pgups.ru