

УДК 621.644, 628.14

Учет разрывов сплошности потока при гидравлических ударах на этапе проектирования напорных трубопроводов из полимерных материалов

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. Учет разрывов сплошности потока при гидравлических ударах на этапе проектирования напорных трубопроводов из полимерных материалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 116–126. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-116-126

Аннотация

Цель: Показать необходимость уточнения в нормативных документах расчетных зависимостей для определения параметров гидравлического удара в напорных трубопроводах при использовании полимерных труб. Обосновать методики расчета гидравлического удара для таких трубопроводов с учетом возможности возникновения разрывов сплошности потока. Привести основные методы, направленные на предотвращение и минимизацию негативных последствий гидравлических ударов. **Методы:** Сравнение различных методик расчета параметров гидравлического удара. Для описания процесса гидравлического удара использован математический метод анализа бесконечно малых величин и метод характеристик. **Результаты:** Показана необходимость проведения на этапе проектирования напорных систем с использованием труб из полимерных материалов поверочных расчетов на гидравлический удар с учетом возможности возникновения в них разрывов сплошности потока и соответствующего отражения в нормативной литературе. **Практическая значимость:** Результаты работы рекомендуется учитывать при проведении поверочных расчетов напорных трубопроводов из полимерных материалов на случай возникновения гидравлических ударов, в том числе с разрывом сплошности потока, и разработке мероприятий по предотвращению таких явлений.

Ключевые слова: Проектирование, напорные трубопроводы, полимерные материалы, гидравлический удар, разрыв сплошности потока, метод характеристик.

Введение

Напорные трубопроводные системы проектируются с учетом не только установившегося гидравлического режима работы, но и проверяются на возможность возникновения в них неустановившихся процессов — гидравлических ударов, вызванных различными причинами [1].

При определенных условиях в процессе гидравлического удара в трубопроводе давление падает ниже атмосферного, что может приводить к появлению разрывов сплошности потока жидкости. Возникновение и последующее схлопыва-

ние таких кавитационных полостей вносит изменения в картину протекания гидравлического удара в целом, влияет на его продолжительность и на величины максимальных ударных давлений в разных частях напорной системы.

Основы теории гидравлического удара были заложены еще в 1899 г. Н. Е. Жуковским [2]. За последующее столетие проводились обширные теоретические и экспериментальные исследования как у нас в стране, так и за рубежом, которые позволили сначала графоаналитическим способом, а позже с использованием «метода характеристик»

и применением компьютерных технологий проводить расчеты трубопроводов на гидравлический удар, более точно учитывая параметры напорной системы и используемого оборудования.

Сегодня для проектировщиков напорных систем водоснабжения в нашей стране одним из основных нормативных документов является СП 31.13330.2012 [1]. В данном своде правил в п. 11.21 сказано о необходимости принимать «величину расчетного внутреннего давления равной наибольшему возможному по условиям эксплуатации давлению в трубопроводе на различных участках по длине (при наиболее невыгодном режиме работы) без учета повышения давления при гидравлическом ударе или с повышением давления при ударе с учетом действия противоударной арматуры». Такая сложная формулировка указывает на то, что производить расчет параметров гидравлического удара рекомендуется, но без уточнения методики расчета.

Следует отметить, что во вступившем в силу с 31 мая 2019 г. СП 399.1325800.2018 [3] в п. 5.6.3 повторяется формулировка п. 11.21 указанного выше свода правил, а затем в п. 5.6.4 отмечается, что давление гидравлического удара рекомендуется определять по формуле, возвращающей нас на столетие назад, — формуле Н. Е. Жуковского, выведенной для некоторых «идеальных» условий процесса.

Актуальность данного исследования заключается в обосновании методики расчета параметров гидравлического удара в напорных трубопроводах из полимерных материалов с учетом возможности возникновения разрывов сплошности потока жидкости, обладающей достаточной для практики точностью, так как существующая нормативная документация не учитывает возможность разрушения стыковых соединений труб и самих напорных труб из полимерных материалов в процессе возможных гидравлических ударов с разрывом сплошности потока.

Методы и материалы

Предметом исследования является процесс возникновения разрывов сплошности потока жидкости при гидравлическом ударе в полимерных трубопроводах. В процессе исследования авторами статьи последовательно применялись такие методы, как теоретический, общеполитический анализ и синтез, наблюдение и моделирование.

Проведен анализ причин возникновения гидравлического удара с разрывом сплошности потока жидкости в напорных трубах из полимерных материалов. В статье обобщены и проанализированы различные методики расчета параметров гидравлического удара. Для описания процесса гидравлического удара использован математический метод анализа бесконечно малых величин и метод характеристик для решения уравнений, описывающих одномерный волновой поток.

Результаты исследования

Низкие скорости распространения волны гидравлического удара в совокупности со сложным, имеющим точки перелома профилем прокладки напорной системы очень часто приводят к снижению давления ниже атмосферного в разных частях трубопровода. В этом случае возрастает вероятность возникновения разрывов сплошности потока, при схлопывании которых возникает волна результирующего давления, которая из-за интерференции волн может вызывать появление давления у источника возникновения гидравлического удара и в любой другой точке напорной системы значительно выше рабочего давления. Образование таких крупных кавитационных пустот в потоке создает условия для возникновения обратной скорости движения жидкости в трубопроводе, значение которой будет превосходить величину исходной скорости жидкости при установившемся режиме.

На практике пренебрежение расчетами напорных систем на случай возникновения нестационарных режимов приводит к разрушительным последствиям, например, описанным в статье [4]. Гидравлический удар произошел в трубопроводе из полиэтилена высокой плотности при остановке всех рабочих насосов и сопровождался сильными колебаниями части трубопровода, проложенного над землей, повреждением и частичным нарушением его крепления. Проведенный расчет показал, что максимальное давление достигло 150 м вод. ст при максимально допустимом — 100 м вод. ст.

Приведенный пример показывает, что, несмотря на эластичность и упругость используемого материала труб, в напорных системах может возникать гидравлический удар, несущий негативные последствия как в виде максимального ударного давления, превышающего рабочее, так и одновременно с этим в системе могут возникать области с понижением давления до вакуумметрического. Подобные неустановившиеся процессы движения, возникающие при транспортировке различных жидкостей гидротранспортными системами, могут приводить к авариям и загрязнению окружающей среды [5, 6].

Причины возникновения разрушительных последствий в каждом конкретном случае должны определяться расчетом параметров гидравлического удара с последующим анализом полученных диаграмм давления в различных точках сети и предложением мер по его предотвращению.

С момента выхода работы Н. Е. Жуковского о гидравлическом ударе в 1898 г. до середины прошлого века, т. е. до начала активного использования вычислительной техники для определения параметров гидравлического удара с использованием «метода характеристик», итогом большей части исследований был вывод формул, определяющих максимальное давление при гидравлическом ударе.

Формула Н. Е. Жуковского позволяет вычислить значение максимального давления при прямом гидравлическом ударе в простом трубопроводе [2]:

$$H = H_0 + \frac{c \cdot V_0}{g}, \quad (1)$$

где H — напор в рассматриваемой точке системы, возникающий в процессе гидравлического удара, м вод. ст.;

H_0 — напор в этой же точке при установившемся режиме движения жидкости по трубопроводу, м вод. ст.;

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

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

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

Многочисленные исследования, проведенные во второй половине XX в., показали, что формула (1) неприменима для расчета разветвленных напорных систем большой протяженности с пересеченным профилем магистралей, в которых давление при гидравлических ударах может понижаться до вакуумметрического. Так, в работе Л. Ф. Мошина [7] отмечается, что максимальный напор в таких системах может достигать величины:

$$H = 3 \cdot H_0 + \frac{c \cdot V_0}{g}. \quad (2)$$

В работах Д. Н. Смирнова и Л. Б. Зубова [8] экспериментально доказано, что максимальное значение напора в системе при гидравлическом ударе с разрывом сплошности потока может быть выше, чем:

$$H = 2 \cdot H_0 + \frac{c \cdot V_0}{g}. \quad (3)$$

Таким образом, значение максимального давления при гидравлическом ударе с образованием крупных кавитационных пустот может дости-

гать величин, значительно превышающих значения, получаемые при вычислениях по формуле Н. Е. Жуковского (1).

В работе [9] авторами данной статьи на основе «метода характеристик» приводятся зависимости для определения величины напора H_i' и скорости движения жидкости V_i' в любой расчетной точке трубопроводной системы X_i для каждого момента времени t' .

В случае длительного понижения давления ниже атмосферного в части трубопровода развивается полость, заполненная парами жидкости и носящая название «разрыв сплошности потока» жидкости. С течением времени, при подходе волны повышения давления данная кавитационная полость схлопывается, что приводит к возрастанию давления в этой точке и возникновению новых колебаний давления во всей напорной системе. Для учета процесса возникновения, развития и схлопывания разрывов сплошности потока образование таких полостей предполагается только в характерных точках, таких как места установки регулирующих органов (насосы, задвижки, обратные клапаны) и в точках перелома профиля трассы трубопровода [9, 10]. Возникновение и существование разрыва сплошности потока предполагается в точке во все моменты времени, пока величина расчетного давления в этих узлах меньше, чем давление насыщенных паров жидкости.

Условие разрыва сплошности потока в точке перелома профиля напорной магистрали зависит от разности углов наклона к горизонту примыкающих к вершине участков водовода и определяется по формуле, предложенной Н. И. Колотило [9]. Образование незначительных кавитационных пустот по длине трубопровода учитывается коэффициентом M_p , предложенным В. С. Дикаревским [11].

Величина давления при гидравлическом ударе изменяется прямо пропорционально величине скорости его распространения по трубопроводу c (1). Для определения этой величины в трубах из поли-

мерных материалов необходимо учитывать упругие свойства грунтов, в которых прокладываются напорные трубопроводы. Учет коэффициента Пуассона грунта μ , глубины заложения оси трубы H (м) и модуля упругости грунта E_K (Па) позволяет повысить точность расчетов параметров гидравлического удара в целом, в этом случае [11, 12]:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E}{E_D}}} = \frac{1435}{\sqrt{1 + \frac{E}{E_D} \cdot \alpha}}, \quad (4)$$

где

$$\alpha = \frac{2 \cdot K \cdot D}{2 \cdot K \cdot \delta + \frac{E_K \cdot D}{E_D}}, \quad (5)$$

$$K = \frac{H^2 + (D/2)^2 + \mu \cdot (H^2 - (D/2)^2)}{(H^2 - (D/2)^2)}, \quad (6)$$

здесь E — модуль упругости перекачиваемой жидкости, Па;

ρ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³;

E_D — модуль упругой деформации материала труб, Па;

α и K — коэффициенты, определяемые соответственно по формулам (5) и (6);

D и δ — соответственно внутренний диаметр и толщина стенки трубопровода, м.

Используя зависимости, перечисленные выше и учитывающие профиль прокладки трубопровода, характер работы регулирующего органа, возможность возникновения кавитационных явлений по длине трубопровода, а в отдельных точках — образование разрывов сплошности потока жидкости, упругое обжатие труб грунтом, можно провести расчеты нестационарных режи-

мов в напорных системах. Ниже представлен график (рис. 1) изменения давления в процессе гидравлического удара, вызванного отключением насоса.

Скорость распространения ударной волны по опытным данным составила 680 м/с [13]. Как видно из диаграммы, перед подходом второй волны повышения давления у обратного клапана давление падает ниже атмосферного более значительно, чем в первой фазе понижения давления.

На рис. 2 представлен характерный график изменения давления у регулирующего органа (задвигки) при гидравлическом ударе с образованием разрыва сплошности потока [11]. Величина ударного давления повышается до своего максимального значения не в первой фазе, а в последующих из-за схлопывания разрывов сплошности потока.

Графики изменения давлений в процессе гидравлического удара можно построить для любой точки напорной системы, что позволяет более эффективно подбирать методы противоударной защиты.

Лучшим способом минимизировать последствия гидравлического удара — это исключить возможность его появления. По определению гидроудар возникает вследствие резкого изменения скорости движения воды, которое может быть вызвано открытием или закрытием задвигки, пуском или остановкой насоса. Поэтому бороться даже с такой причиной гидравлического удара, как отключение электроэнергии, а вследствие этого и отключением насосов, возможно путем применения аварийного источника питания и частотного регулирования.

Для предотвращения разрывов сплошности потока необходимо комплексно решать вопрос с прокладкой трассы трубопроводов. Возможно, делить трассу на отдельные участки и применять несколько насосных станций; минимизировать количество точек перелома профиля, в кото-

рых соблюдается условие образования разрывов сплошности потока (9). Однако наилучшим образом защитить напорную систему от гидравлических ударов можно, только проведя расчет его параметров.

Для смягчения негативных последствий в местах возможного снижения давления ниже атмосферного можно впускать воздух или воду. Данные мероприятия и их осуществление подробно рассмотрены в работах [9–11]. Вода или воздух заполняет образующиеся пустоты, что снижает значения как максимальных, так и минимальных давлений во всей системе. Метод имеет свои ограничения по применению, такие как громоздкость, обеспечение качества транспортируемой воды, дополнительные материальные затраты. Но на территории насосной станции при возможности понижения давления ниже атмосферного впуск воды или воздуха эффективен и надежен.

В случае возможности всесторонних расчетов на различные режимы параметров гидравлического удара можно воспользоваться простым методом противоударной защиты — деление трассы на участки с помощью установленных обратных клапанов. В случае возникновения гидравлического удара обратные клапаны при подходе воды, движущейся в обратном направлении, разобьют трубопровод на отдельные участки. Применение данного метода требует расчета с учетом времени срабатывания обратного клапана и места установки устройства на трассе.

В случае надземной прокладки трубопроводов необходимо учитывать продольные осевые силы, которые действуют на надземные участки трубопровода на трубопроводной эстакаде. Применение новых материалов для изготовления самих труб, опор для их прокладки [14] должно быть не только экономически эффективно, но и отвечать критериям надежности и долговечности.

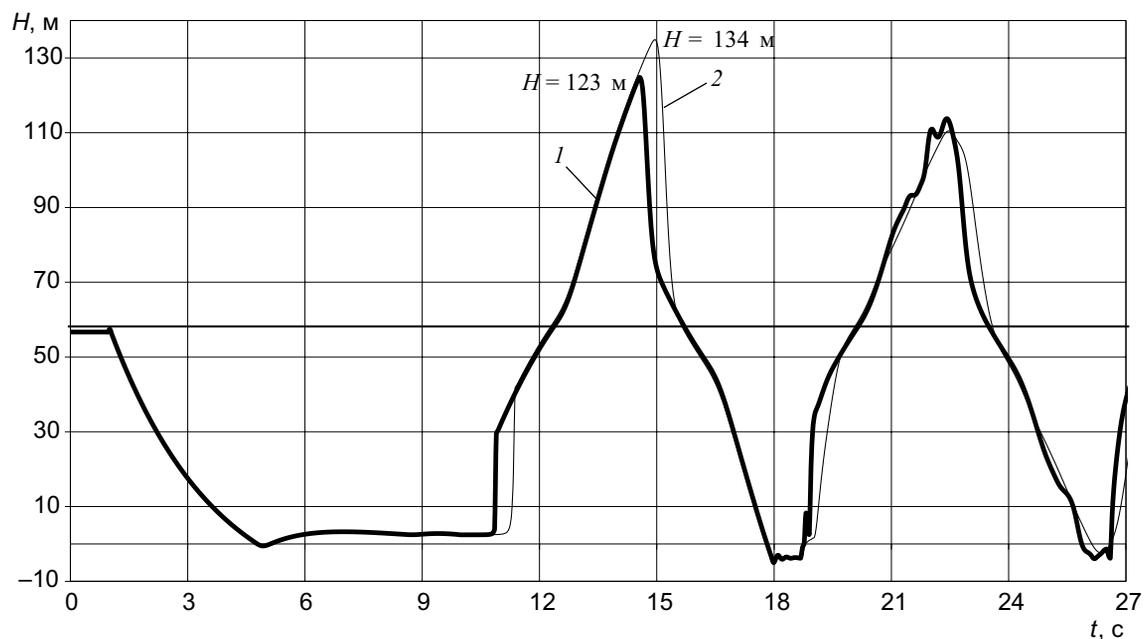


Рис. 1. Графики изменения давления у обратного клапана у насоса:
1 — график, построенный по экспериментальным данным [10];
2 — график, полученный по расчетным значениям

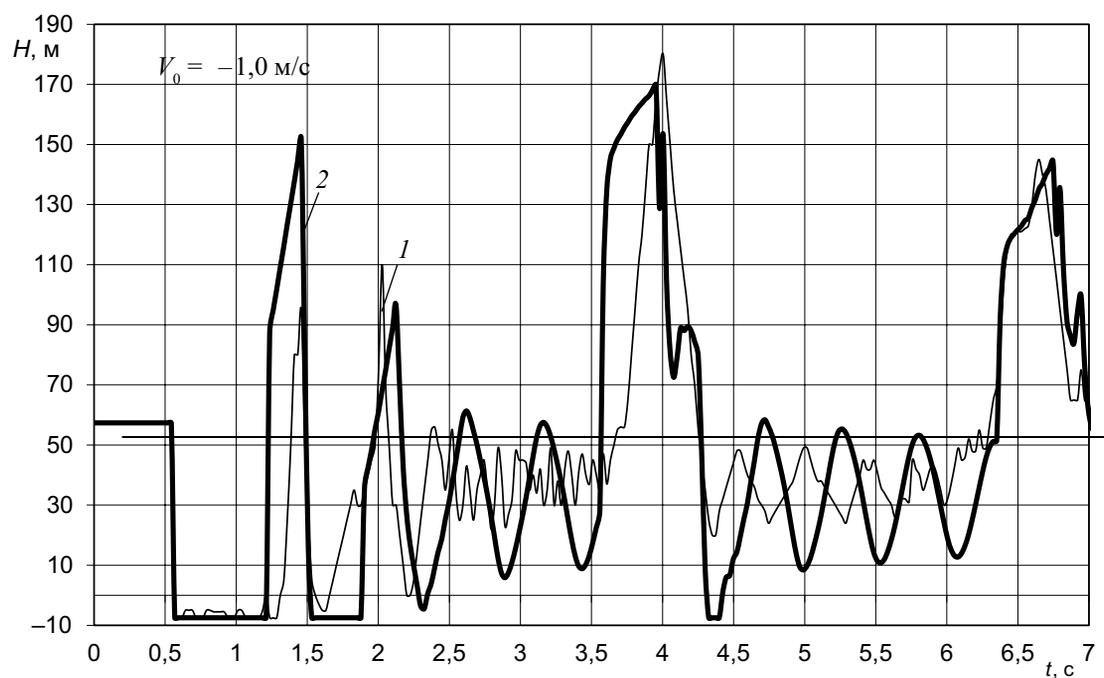


Рис. 2. Графики изменения давления у задвижки:
1 — график, построенный по экспериментальным данным;
2 — график, полученный по расчетным значениям

Критерием применимости того или иного метода противоударной защиты является не только его стоимость, а еще и стоимость мероприятий по устранению аварий, которые могут произойти при гидравлическом ударе. Комплекс достаточных и эффективных мероприятий должен основываться на расчетах, а не предположениях о величине давления в различных характеристических точках системы.

Обсуждение

Производители различных пластмассовых труб в сопроводительных документах и внутренних инструкциях подчеркивают, что эластичные и упругие пластмассовые трубы обладают большей транспортирующей способностью и устойчивостью к гидравлическим ударам, чем трубы аналогичного диаметра, но изготовленные из стали или чугуна. При этом подразумевается, что расчет величины максимального ударного давления при возможном гидравлическом ударе в таких трубах даже не требуется.

Основываются эти утверждения на рассуждениях о том, что максимальное давление в случае гидравлического удара находится в прямой зависимости от скорости ударной волны, которая для труб из полимерных материалов составляет от 250 до 450 м/с, что значительно ниже, чем для стальных или чугунных труб. Но подобные рассуждения не учитывают ни волновой характер процесса гидравлического удара, ни профиль прокладки трубопровода, ни влияние упругих свойств грунта [15].

Очень часто при этом апеллируют к данным в соответствии с нормами NPG (Nordiska Plastror Gruppen) [16], в которых в п. 2.3.1 отмечается: «Обычно считается, что трубы из термопластиков (ПЭ, ПП и ПВХ) не требуют расчета на гидравлический удар, если максимальное давление в трубопроводе при гидравлическом ударе не превышает в 1,5 раза номинальное давление». Означает

это только то, что сначала нужно провести расчет параметров гидравлического удара, выяснить максимальную величину ударного давления, сравнить его с давлением при установившемся движении и только потом делать вывод о необходимости применения методов и устройств, предотвращающих сам гидравлический удар или снижающих его негативные последствия.

На следующей странице [16] в п. 2.3.1 отмечается: «Напорные трубопроводы должны быть рассчитаны так, чтобы отрицательное давление в них никогда не достигало уровня, при котором мог бы возникнуть вакуум». В расчетах на гидравлический удар надо обращать внимание не только на значение максимального давления, но также рассматривать и анализировать возникновение в трубопроводе областей с понижением давления ниже атмосферного. Длительные по времени колебания давления то выше, то ниже атмосферного с течением времени негативно влияют на прочностные характеристики труб и их соединений. Авторы [4] отмечают, что опасным для любой системы является не только повышение величины давления, но и его понижение, особенно ниже атмосферного. В статье [4] подчеркивается, что при понижении давления возможны: «смятие пластиковых и тонкостенных стальных труб; отслоение цементно-песчаной внутренней облицовки труб; подсос грязной воды или воздуха в трубопровод через фланцевые соединения или соединительные муфты, сальниковые уплотнения или места утечки; разрыв сплошности потока, за которым следуют высокие скачки давления в результате схлопывания образовавшихся паровых полостей».

Формула (1), к которой отсылает нас [3], не учитывает интерференцию волн, изменения скорости движения потока по времени, профиль прокладки трубопровода при гидравлическом ударе в напорной системе из любого материала труб. Как показывают уже произошедшие аварии

на существующих системах, оговорка про специфичность и уникальность полимерного материала труб несостоятельна. Необходимо расчетом определять опасные участки системы и на них при необходимости использовать трубы из других материалов, делая поверочные расчеты.

На сегодняшний день практическую ценность имеют только методики расчета, комплексно учитывающие все особенности напорной системы. В этом случае, проведя анализ результатов расчета, можно сделать выводы о показателях работы системы, наиболее значимо влияющих на величину давления при гидравлическом ударе и на характер протекания всего процесса в целом.

Основываясь на проведенных всесторонних расчетах, можно подобрать комплекс противоударных мероприятий и проверить его эффективность, смоделировав процесс протекания гидроудара при принятом способе защиты. В случае расчета с использованием только формулы (1), определяющей величину максимального ударного давления, применение эффективной защиты сомнительно.

Пренебрежительное отношение к выработке комплекса мер по предотвращению или смягчению негативных последствий гидравлического удара приводит к снижению надежности всей системы в целом [14], а в последствии к увеличенным затратам на проведение мероприятий по устранению аварии и внедрению мер противоударной защиты. На практике очень часто только после аварии из-за гидравлического удара и катастрофических последствий предусматривается противоударная защита, иногда даже излишняя [4].

Заключение

Представленные результаты доказывают, что нельзя сводить расчеты параметров гидравлического удара только к определению величины максимального ударного давления по формуле

Н. Е. Жуковского. Использование метода характеристик для моделирования процесса гидравлического удара в напорных системах из полимерных материалов позволяет определять места разрывов сплошности потока, величину падения давления ниже атмосферного и максимальные значения давления в системе с учетом всех факторов, тем самым позволяя подбирать более эффективный комплекс мероприятий по противоударной защите.

Библиографический список

1. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84. — М., 2021. — 147 с.
2. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. — М.; Л.: ГИТТЛ, 1949. — 104 с.
3. СП 399.1325800.2018. Системы водоснабжения и канализации наружные из полимерных материалов. Правила проектирования и монтажа. — М., 2021. — 130 с.
4. 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.
5. Titova T. Accident at river-crossing underwater oil pipeline / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova, A. Elizaryev // MATEC Web of Conferences. — 2018. — № 239.06003.
6. Ryzhova L. V. Ensuring Environmental Safety during the Construction and Operation of Tunnels in Residential Areas / L. V. Ryzhova, T. S. Titova, S. G. Gendler // Procedia Engineering. — 2017. — № 189. — Pp. 404–410.
7. Мошнин Л. Ф. Расчеты гидравлического удара / Л. Ф. Мошнин, Е. Т. Тимофеева. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952. — 200 с.
8. Смирнов Д. Н. Гидравлический удар в напорных водоводах / Д. Н. Смирнов, Л. Б. Зубов. — М.: Стройиздат, 1975. — 122 с.
9. Капинос О. Г. Последствия гидравлических ударов, сопровождающихся разрывами сплошности потока жидкости / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Известия

Петербургского университета путей сообщения. — 2011. — Вып. 3(28). — С. 167–176.

10. Твардовская Н. В. Гидравлический удар в напорных трубопроводах водоотведения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. В. Твардовская. — СПб.: СПбГАСУ, 2005. — 24 с.

11. 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.

12. 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.

13. Христов Хр. Резултати от натуралните изледвания на хидравличния удар в някои наши помпени станции / Хр. Христов // Изв. на института по водни проблеми БАН. Отд. за техн. Науки. — 1969. — Т. 10. — С. 121–185.

14. 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. — Pp. 250–253.

15. Капинос О. Г. Степень влияния различных факторов на величину давления при гидравлических ударах / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. — 2014. — № 114. — С. 122–126.

16. Пластмассовые трубы, их характеристики и область применения. — Стокгольм: NPG, 1999. — 114 с.

Дата поступления: 02.02.2022

Решение о публикации: 28.02.2022

Контактная информация:

КАПИНОС Ольга Геннадьевна — канд. техн. наук, доцент; olk1975@mail.ru

ТВАРДОВСКАЯ Надежда Владимировна — канд. техн. наук, доцент; tvardovskaya@pgups.ru

Accounting for Flow Discontinuities While Water Hammers at Engineering Stage of Pressure Pipelines Made of Polymeric Materials

O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaya

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

For citation: Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. Accounting for Flow Discontinuities While Water Hammers at Engineering Stage of Pressure Pipelines Made of Polymeric Materials // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 116–126. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-116-126

Summary

Purpose: To show the need to clarify calculation dependencies in regulatory documents for determining the parameters of water hammer in pressure pipelines when using polymeric pipes. To substantiate the methods to calculate hydraulic shock for such pipelines taking into account the appearance possibility of flow discontinuities. To present the main methods aimed at prevention and minimization of the negative consequences of water hammers. **Methods:** Comparison of various methods for the calculation of parameters of water hammer. To describe the process of water hammer the mathematical method of analysis of infinitesimals and characteristic method are used. **Results:** It is shown that it is necessary to carry out at engineering stage of pressure systems using pipes made of polymeric materials the verification calculations for water hammer taking into account the appearance possibility of flow discontinuities there and to reflect it correspondingly in a normative literature. **Practical importance:** The results of the work are recommended to be taken into account when carrying out verification calculations of pressure pipelines made of polymeric materials in case of water hammer occurrence including with a break in flow continuity and developing the measures to prevent such phenomena.

Keywords: Engineering, pressure pipelines, polymeric materials, water hammer, flow continuity, flow discontinuity, method of characteristics.

References

1. SP 31.13330.2012. *Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.04.02-84* [SP 31.13330.2012. Water supply. External networks and structures. Updated edition of SNIp 2.04.02-84]. Moscow, 2021. 147 p. (in Russian)
2. Zhukovskiy N. E. *O gidravlicheskom udare v vodoprovodnykh trubakh* [On hydraulic shock in water pipes]. Moscow: GITTL Publ., 1949. 104 p. (in Russian)
3. SP 399.1325800.2018. *Sistemy vodosnabzheniya i kanalizatsii naruzhnye iz polimernykh materialov. Pravila proektirovaniya i montazha* [SP 399.1325800.2018. External water supply and sewerage systems made of polymeric materials. Rules for design and installation]. Moscow, 2021. 130 p. (in Russian)
4. Lyudeke Kh.-Y. *Gidroudar: prichiny, analiz i sposoby predotvrashcheniya* [Water hammer: causes, analysis and ways to prevent]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering]. 2015, I. 8, pp. 62–69. (in Russian)
5. Titova T. Accident at river-crossing underwater oil pipeline / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova, A. Elizaryev // MATEC Web of Conferences. 2018. I. 239.06003.
6. Ryzhova L. V. Ensuring Environmental Safety during the Construction and Operation of Tunnels in Residential Areas / L. V. Ryzhova, T. S. Titova, S. G. Gendler // *Procedia Engineering*. 2017. I. 189. Pp. 404–410.
7. Moshnin L. F. *Raschety gidravlicheskogo udara* [Calculations of hydraulic shock]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1952. 200 p. (in Russian)

8. Smirnov D. N. *Gidravlicheskiy udar v napornykh vodovodakh* [Hydraulic shock in pressure conduits]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1975. 122 p. (in Russian)
9. Kapinos O. G. Posledstviya gidravlicheskiykh udarov, soprovozhdayushchikhsya razryvami sploshnosti potoka zhidkosti [Consequences of hydraulic shocks accompanied by discontinuities in fluid flow]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the Petersburg University of Communications]. 2011, I. 3(28), pp. 167–176. (in Russian)
10. Tvardovskaya N. V. *Gidravlicheskiy udar v napornykh truboprovodakh vodootvedeniya. Kand. Diss* [Hydraulic shock in pressure pipelines of water disposal. Cand. Diss]. St. Petersburg: SPbGASU Publ., 2005. 24 p. (in Russian)
11. Dikarevskiy V. S. *Gidravlicheskiy udar v napornykh truboprovodakh vodootvedeniya* [Hydraulic shock in pressure sewerage pipelines]. *Vestnik RAASN* [Vestnik RAASN]. 2004, I. 8, pp. 152–156. (in Russian)
12. Kapinos O. G. Vliyaniye vybrannogo materiala trub na velichinu davleniya v truboprovode pri vozmozhnom gidravlicheskom udare [Influence of the selected pipe material on the magnitude of pressure in the pipeline with a possible hydraulic shock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2008, I. 2(15), pp. 112–119. (in Russian)
13. Khristov Khr. Rezultati ot naturalnite izledvaniya na khidravlichniya udar v nyakoi nashi pompeni stantsii [Results from natural research on hydraulic shock to some of our pumping stations]. *Izv. na instituta po vodni problemi BAN. Otd. za tekhn. Nauki* [Izv. at the Institute for Water Problems BAN. Dep. for tech. Science]. 1969, V. 10, pp. 121–185. (in Russian)
14. 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*. Pp. 250–253.
15. Kapinos O. G. Stepen' vliyaniya razlichnykh faktorov na velichinu davleniya pri gidravlicheskiykh udarakh [The degree of influence of various factors on the magnitude of pressure during hydraulic shocks]. *Komunal'ne gospodarstvo mist. Ceriya: Tekhnichni nauki ta arkhitektura* [Communal State of Mist. Series: Technical sciences and architecture]. 2014, I. 114, pp. 122–126. (in Russian)
16. *Plastmassovye truby, ikh kharakteristiki i oblast' primeneniya* [Plastic pipes, their characteristics and scope]. Stokgol'm: NPG Publ., 1999. 114 p. (in Russian)

Received: February 2, 2022

Accepted: February 28, 2022

Author's information:

Olga G. KAPINOS — PhD in Engineering, Associate Professor; olk1975@mail.ru

Nadezhda V. TVARDOVSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor; tvardovskaya@pgups.ru