Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2018, №1, Том 5 / 2018, No 1, Vol 5 <https://t-s.today/issue-1-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/09SATS118.pdf>

DOI: 10.15862/09SATS118 (<http://dx.doi.org/10.15862/09SATS118>)

Статья поступила в редакцию 06.02.2018; опубликована 30.03.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Сафронов В.С., Суханова Ю.А., Барченкова Н.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния висячего трубопровода при гидравлическом ударе // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/09SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/09SATS118

For citation:

Safronov V.S., Sukhanova Ju.A., Barchenkova N.A. (2018). Modeling of stressed-strained state of the hanging pipe hydrostatic shock. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/09SATS118.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/09SATS118

УДК 624.5(628.143)+624.042.8:532.5

Сафронов Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия
Профессор кафедры «Строительной механики»
Доктор технических наук
E-mail: vss22@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=520340

Суханова Юлия Алексеевна

ООО «Выбор», Воронеж, Россия
Ведущий инженер проектного отдела
Кандидат технических наук
E-mail: vss22@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=775481

Барченкова Надежда Александровна

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия
Доцент кафедры «Строительной механики»
Кандидат технических наук
E-mail: nadia7194@yandex.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=269557

Моделирование напряженно-деформированного состояния висячего трубопровода при гидравлическом ударе

Аннотация. Постановка исследований. Изучается динамическая реакция висячей несущей системы трубопровода не прямолинейной формы на действующие при возникновении гидравлического удара воздействия.

Результаты. Описывается методика и результаты её апробации для описания нестационарных колебаний однопролетного висячего водовода при возникновении гидравлического удара, ориентированная на использование современных вычислительных комплексов. Используется динамическая конечно-элементная расчетная схема для оценки максимальных усилий в несущих элементах сооружения от действий ударных нагрузок при

нестационарных режимах эксплуатации, обусловленных внезапной остановкой насоса или закрытии заслонки. Результаты теоретических расчетов сопоставляются с данными, полученными при обследовании эксплуатируемого висячего однопролетного водовода.

Выводы. Применение в инженерной практике предлагаемой методики позволяет прогнозировать поведение висячего трубопровода при нестационарных режимах эксплуатации и избежать возникновения аварийных ситуаций. В условиях гидравлического удара в трубопроводах со сложным профилем возникают ударные усилия, которые могут значительно превышать усилия от статических нагрузок.

Ключевые слова: висячий трубопровод; динамический расчет; гидравлический удар; напряженно-деформированное состояние; усилия; прочность при эксплуатации

Введение

Одним из наиболее опасных явлений, наблюдаемых в трубопроводных системах, является гидравлический удар [1]. Он представляет собой колебательный процесс, возникающий в деформируемом трубопроводе для жидких продуктов при кратковременном изменении стационарного режима эксплуатации, например, при внезапном закрытии крана или заслонки, характеризующийся циклами резкого увеличения и уменьшения давления внутри трубы. Причиной возникновения гидравлического удара может быть также внезапная остановка насоса или наличие воздуха в системе. Часто гидравлический удар наблюдается вблизи изгибов и ответвлений трубопровода или участков, на которых меняется его поперечное сечение. Для прямолинейных подземных или надземных трубопроводов возникновение избыточного давления в системе при гидравлическом ударе является основной причиной аварий. Методика его определения была разработана еще в начале XX века и описана в монографиях [2, 3].

При эксплуатации надземных трубопроводных переходов со сложным профилем, включая гибкие висячие переходы, существенное значение имеют инерционные силы, возникающие при резком изменении скорости транспортируемой жидкости, особенно в местах перелома профиля трубопровода. Напряженно-деформированное состояние трубопровода и поддерживающих несущих элементов при возникновении гидравлического удара зависит от конструктивного решения трубопроводного перехода. Применительно к висячим несущим системам рассматриваемая задача до настоящего времени мало изучена. Задача осложняется нелинейным характером деформирования [4-7]. В настоящей работе описываются алгоритмы определения сил ударного воздействия при гидравлическом ударе в трубопроводном переходе непрямолинейной конфигурации и методика динамического расчета трубопровода с висячей несущей системой с вертикальными подвесками с использованием конечно-элементных расчетных схем. Результаты теоретических расчетов сопоставляются с данными, полученными при обследовании эксплуатируемого сооружения.

1. Описание инерционных сил при гидравлическом ударе

Представим трубопроводный переход из одного повышенного прямолинейного отрезка и двух концевых подземных участков, которые сопряжены с основным вертикальными сопрягающими участками. Рассмотрим два случая возникновения гидравлического удара: при резком срабатывании запорного устройства и при внезапной остановке насоса. Схема нагрузок представлена на рис. 1.

Рисунок 1. Схема приложения инерционных сил в трубопроводе с переломами профиля при гидравлическом ударе (составлен авторами)

При закрытии заслонки прилегающий к ней объем жидкости тормозится, в то время как жидкость в остальной системе теряет скорость не сразу, создавая волну повышения давления, распространяющуюся от заслонки к насосу со скоростью c распространения звуковой волны в данной среде. При торможении жидкости на разных участках профиля в местах его перелома возникают ударные импульсные воздействия, имеющие направление в сторону заслонки.

При внезапной остановке насоса жидкость постепенно замедляется, а затем начинает двигаться в обратном направлении, пока не достигает насоса. В данном случае волна повышения давления распространяется в сторону заслонки, а инерционные силы направлены от заслонки к насосу. В случае, если насос имеет неподвижные лопасти или оснащен клапаном, не дающим жидкости из системы возвращаться в резервуар, гидравлический удар может иметь особенно разрушительные последствия.

Гидравлический удар – циклический процесс, поэтому ударные воздействия повторяются несколько раз с периодом T_h , равным удвоенному времени прохождения ударной волны от заслонки к насосу, и затухающей амплитудой (см. рис. 2). Величина затухания амплитуды ударного воздействия зависит от жесткостных и демпфирующих свойств трубопроводной системы.

Для определения ударных сил, возникающих в трубопроводе, авторами использовался закон сохранения энергии [5, 6]:

$$\frac{M \cdot v_0^2}{2} = F_h \cdot f + p_{ex} \cdot \Delta V + \Delta U$$

В левой части уравнения представлено выражение для кинетической энергии движущейся жидкости на рассматриваемом участке трубопровода. В правой части: первое слагаемое – работа искомой силы по деформированию трубопроводной системы, второе слагаемое – работа избыточного давления по изменению объема трубы, находящаяся из формулы Жуковского и уравнения Лапласа для цилиндрических оболочек, третье слагаемое – дополнительные потери энергии, связанные с демпфированием.

Рисунок 2. График зависимости амплитуды ударного воздействия от времени (составлен авторами)

Заметим, что максимальное значение инерционной силы зависит от жесткости трубопроводной системы. Рассмотрим в качестве примера два случая возникновения гидравлического удара в П-образном трубопроводе с общей длиной горизонтального участка 115 м и внутренним диаметром трубы 80 см, опирающемся на железобетонные пилоны в первом случае без ограничения на продольные смещения (скользящая опора, рис. 3а), во втором случае с наложением связи на продольные смещения относительно опоры (шарнирно-неподвижное закрепление, рис. 3б).

Рисунок 3. Схемы деформирования П-образного трубопровода:
а) со скользящим опиранием; б) с шарнирно-неподвижным опиранием
(разработан авторами)

В первом случае ударная сила совершает работу по деформированию относительно гибкой П-образной рамы, моделирующей изогнутый трубопровод, и ее модуль составляет 830 кН. Во втором же совершается работа по деформированию более жесткой анкерной железобетонной опоры со свайным основанием, размеры которой приведены нами в работе [5]. В этом случае ударная сила имеет модуль 3750 кН.

2. Динамический расчет трубопровода с висячей несущей системой

Рассмотрим гидравлический удар в висячем трубопроводном переходе классической двухпилонной системы со средним пролетом длиной 76 м, подвешенным с помощью вертикальных подвесок к кабелю диаметром 7 см и крайними пролетами, шарнирно опирающимися на железобетонные опоры пилонов и анкерных фундаментов. Диаметр трубопровода 82 см. Динамическая расчетная схема представлена на рис. 4. Трубопровод, пилоны и технологические мостики моделируются при помощи конечных элементов пространственного стержня, несущий кабель и подвески — при помощи специального нелинейного КЭ на основе гибкой нити. В динамической расчетной схеме учитывались распределенные массы конечных элементов, автоматически приводимые к узловым, а также дополнительные узловые массы, моделирующие массу жидкости внутри трубопровода. С

внутренней стороны анкерных опор были предусмотрены упругие КЭ, моделирующие сильфонные компенсаторы, устанавливаемые на трубопроводах с целью компенсации температурных деформаций. Жесткость стержневых упругих КЭ принималась в соответствии с номенклатурой применяемых в строительстве сильфонных компенсаторов равной 11 кН/мм. Динамический расчет выполнялся с помощью конечно-элементного вычислительного комплекса SAP 2000. При этом за начальное было принято деформированное состояние несущей системы после приложения временной нагрузки от веса жидкости.

Рисунок 4. Расчетная схема трубопроводного перехода (разработана авторами)

В расчетах принимались следующие два вида закрепления трубопровода:

- с шарнирно-подвижными опорами в месте расположения анкерного фундамента (ударное воздействие 830 кН);
- с шарнирно-неподвижными опорами (ударное воздействие 3750 кН).

Ударная сила прикладывается к правому концу трубопровода так, как показано на рис. 3 и 4. График изменения инерционной силы от гидравлического удара по времени представлен на рис. 5.

Рисунок 5. График изменения инерционной силы в кН при гидравлическом ударе по времени (разработан авторами)

Период повторения импульсного воздействия принят равным 3 с., затухание – 20 %. Эти величины зависят от протяженности трубопроводной системы и в данном расчете приняты условно. При втором варианте моделирования предполагается, что сила начального ударного воздействия достаточно велика для разрушения опорного узла трубопровода, ближайшего к точке ее приложения, поэтому перед выполнением динамического расчета продольная связь с этого узла снимается и определяются деформации для измененной схемы.

Результаты динамических расчетов в виде эпюр распределения нормальных сил и изгибающих моментов по длине трубопровода для момента достижения максимальных значений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты динамического расчета двух схем трубопроводного перехода (эпюры в таблице приведены по результатам авторских расчетов)

Как видно из эпюр изгибающего момента и продольной силы, представленных в табл. 1, усилия, возникающие в системе с продольным закреплением трубопровода на анкерных опорах, на порядок превышают усилия по первой схеме. Аналогичные результаты получены и для продольных перемещений точки приложения нагрузки (см. рис. 6). Следует отметить, что в случае скользящего закрепления трубопровода на железобетонных опорах усилия распределяются более равномерно по длине пролета, в то время как максимумы изгибающего момента и продольной силы по второй схеме концентрируются вблизи точки приложения ударной нагрузки, что создает опасность разрушения трубопровода и поддерживающих конструкций.

График продольных перемещений трубопроводного перехода, построенный на основании результатов динамического расчета схемы с неподвижным опорным узлом (см. рис. 6), свидетельствует о возникновении слабозатухающих колебаний с высокой частотой (4,34 Гц) и амплитудой, превышающей 20 см. Такие колебания могут приводить к усталостному разрушению материала трубопровода, и должны устраняться путем увеличения гибкости и усиления демпфирующих свойств трубопроводной системы. Коэффициенты демпфирования,

использованные при проведении динамических расчетов, были установлены по данным натурных измерений на эксплуатируемом водоводе.

Рисунок 6. Продольные перемещения точки приложения нагрузки по времени (графики приведены по результатам авторских расчетов)

3. Сопоставление с данными обследования эксплуатируемого висячего водовода

Апробация рассмотренной методики было произведена на трубопроводном переходе через р. Ока в г. Орел, рассмотренном авторами в публикациях [4-7]. Общий вид трубопровода представлен на рис. 7, а его конструктивные характеристики соответствуют перечисленным выше при описании динамической расчетной схемы на рис. 4.

Рисунок 7. Общий вид трубопровода в г. Орле через р. Ока (составлен авторами)

На трубопроводном переходе через р. Оку был реализован неподвижный узел опирания трубы на анкерный фундамент с помощью приварки металлических ребер-фиксаторов. Сильфонные компенсаторы температурных деформаций установлены с внутренней стороны от опорного узла. При натурном обследовании водовода было установлено, что за время эксплуатации его пролетное строение испытало значительные деформации в продольном направлении в результате силовых воздействий при возникновении в системе неоднократных гидравлических ударов. В трубопроводе вблизи правобережной анкерной опоры произошло разрушение сварного шва. Картина деформирования и величина остаточных перемещений и усилий, достаточных для срезки фиксаторов и разрушения материала трубы, могут быть объяснены возникновением в системе гидравлического удара. По-видимому, после срезки

фиксаторов на одной из опор и деформации опорного узла схема трубопровода приобрела гибкость, достаточную для устранения аварийных ситуаций в дальнейшем.¹

Выводы

Выполненные теоретические исследования, численные расчеты и анализ сопоставления теоретических расчетов с данными обследования эксплуатируемого водовода приводят к следующим выводам.

1. В условиях гидравлического удара в трубопроводах большого диаметра со сложным профилем возникают ударные усилия, которые могут значительно превышать усилия от статических нагрузок.
2. Ударные усилия, возникающие в трубопроводе, увеличиваются с ростом жесткости системы в продольном направлении.
3. Установка фиксаторов, препятствующих смещению трубопровода в продольном направлении, способствует существенному возрастанию сил ударного воздействия и увеличению усилий в элементах несущей системы.
4. Увеличение общей гибкости трубопроводного перехода и устранение неподвижных опорных узлов позволит избежать разрушительных последствий гидравлического удара и обеспечит более равномерное распределение усилий по длине пролета.
5. Применение в инженерной практике предлагаемой методики позволяет прогнозировать поведение висячего трубопровода при возникновении гидравлического удара и избежать возникновения аварийных ситуаций.

¹ <http://docplayer.ru/37176183-Nelineynoe-deformirovanie-i-gidravlicheskiy-udar-v-visyachih-truboprovodnyh-perehodah.html>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов. – М.: Стройиздат, 1982. – 423 с.
2. Сурин, А.А. Гидравлический удар в водопроводах и борьба с ним / А.А. Сурин. – М.: Государственное транспортное железнодорожное изд-во, 1946. – 371 с.
3. Жуковский, Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н.Е. Жуковский – М.: Гос. изд. технико-теоретической лит-ры, 1949. – 103 с.
4. Denison E.B., Stevenson W.H. Oscillatory flow measurements with a directionally sensitive laser velocimeter. The Review of Scientific Instruments, 1970, v. 41, №10.
5. Harris J., Peev G., Wilkinson W.L. Velocity profiles in laminar oscillatory flow in tubes. J. of Scientific Instruments, 1969, v. 40, №2.
6. Сафронов, В.С. Прочностной анализ несущих конструкций висячего трубопровода через реку Ока в г. Орел / В.С. Сафронов, Ю.А. Суханова // Строительная механика и конструкции – Воронеж, 2010. – Вып. 1, С. 59-64.
7. Сафронов, В.С. Динамический расчет висячего трубопровода при гидравлическом ударе / В.С. Сафронов, Ю.А. Суханова // Строительная механика и конструкции. – Воронеж, 2011 – Вып. 1 (2), 2011, С. 67-77.
8. Сафронов, В.С. Предотвращение разрушения висячих трубопроводных переходов при внезапной остановке насоса / В.С. Сафронов, Ю.А. Доманова // Механика разрушения бетонов, железобетонов и других строительных материалов. Сборник статей по материалам 7-й международной научной конференции: в двух томах – Воронеж, 2013 – С. 39-46.
9. Сафронов, В.С. Динамические характеристики висячих двухпильонных трубопроводных переходов с вертикальными подвесками / В.С. Сафронов, Ю.А. Доманова // Научный вестник ВГАСУ. – Воронеж, 2015. – Вып. 1 (37) – С. 112-123.

Safronov Vladimir Sergeevith

Voronezh state technical university, Voronezh, Russia
E-mail: vss22@mail.ru

Sukhanova Julia Alekseevna

ООО «Wybor», Voronezh, Russia
E-mail: vss22@mail.ru

Barchenkova Nadezhda Aleksandrovna

Voronezh state technical university, Voronezh, Russia
E-mail: nadia7194@yandex.ru

Modeling of stressed-strained state of the hanging pipe hydrostatic shock

Abstract. Staging studies. Examines the dynamic reaction of hanging carrier pipeline system is not rectilinear forms on the current when an water hammering effects.

The results. Describes the methods and results of its testing to describe non-stationary fluctuations odnoproletnogo hanging water pipeline when an hydraulic impact, focused on the use of modern computing systems. Uses dynamic finite-element computation scheme for estimating maximum efforts in carrying elements of constructions from the actions of shock loads in unsteady operating conditions resulting from the sudden stop of the pump or closing the flaps. The results of theoretical calculations are compared with data obtained in the survey operated hanging odnoproletnogo water pipeline.

Conclusions. Application in engineering practice, the proposed methodology allows you to predict the behavior of the hanging pipe in unsteady operating conditions and avoid accidents. Under conditions of water hammer in pipelines with complex profile raises drums efforts that can greatly exceed the efforts from static loads.

Keywords: hanging pipe; dynamic calculation; hydraulic punch; stress-strain State; efforts; operation strength

REFERENCES

1. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. (1982). *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody. [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives.]* Moscow: Stroyizdat, p. 423.
2. Surin A.A. (1946). *Gidravlicheskiy udar v vodoprovodah i bor'ba s nim. [Hydraulic shock in water pipes and the fight against it.]* Moscow: State Railway Transport Publishing House, p. 371.
3. ZHukovskij N.E. (1949). *O gidravlicheskom udare v vodoprovodnyh trubah. [About hydraulic shock in water pipes.]* Moscow: Gos. ed. technical and theoretical literature, p. 103.
4. Denison E.B., Stevenson W.H. (1970). Oscillatory flow measurements with a directionally sensitive laser velocimeter. *The Review of Scientific Instruments*, 10(41).
5. Harris J., Peev G., Wilkinson W.L. (1969). Velocity profiles in laminar oscillatory flow in tubes. *J. of Scientific Instruments*, 2(40).
6. Safronov V.S., Suhanova Yu.A. (2010). Strength analysis of load-bearing structures of a suspended pipeline across the Oka River in the city of Orel. *Construction mechanics and structures*, 1, pp. 59-64.
7. Safronov V.S., Suhanova Yu.A. (2011). Dynamic calculation of a hanging pipeline with a hydraulic shock. *Construction mechanics and structures*, 1(2), pp. 67-77.
8. Domanova Yu.A., Safronov V.S. (2013). Preventing the destruction of suspended pipelines when the pump stops suddenly. *Mechanics of destruction of concrete, reinforced concrete and other building materials*, pp. 39-46.
9. Domanova Yu.A., Safronov V.S. (2015). Dynamic characteristics of suspended double-pylon pipeline crossings with vertical suspension. *Scientific Herald of VGASU*, 1(37), pp. 112-123.