

tizimlarini qurish ko'p rejimli prinsipga asoslanadi, bu boshqaruv ta'siri joriy dinamik vaziyatga qarab hosil bo'lishi mumkin. Boshqaruv ta'sirlarini shakllantirish uchun, real vaqt rejimida texnologik jarayon axborot-o'lchov tizimidan olingan o'lchov ma'lumotlari, shuningdek kompleksning ishlashi davomida to'plangan katta ma'lumotlar ishlatiladi.

ADABIYOTLAR

1. Кулиев А.М., Алекперов Г.З., Тагиев В.Г. Технология и моделирование процессов подготовки природного газа. - М.: Недра, 1978. - 232 с.
2. Тараненко Б.Ф., Герман В.Т. Автоматическое управление газопромышленными объектами. - М.: Недра, 1976. - 213 с.
3. Iguchi Manabu, Ilegbusi Olusegun J. Modeling Multiphase Materials Processes: Gas-Liquid Systems. - Springer, 2010.
4. Шукурова О.П. Моделирование и оптимизация процесса осушки газа в многофункциональных абсорберов // Кимёвий технология. Назорат ва бошқарув. Халқаро илмий-техникавий журнал. 2012, № 4, 86-88 бет
5. Seborg D.E., Mellichamp D.A., Edgar T.F., Doyle III F.J. Process Dynamics and Control, International Student Version - 3rd ed. - Wiley, 2011.
6. Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Кузьмин Н.Н. Математические модели управляемых массо- и теплообменных процессов в комплексе технологических систем «Абсорбция- Десорбция» // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2011. - № 6 (119). - С. 255-264.
7. Шукурова О.П. Алгоритмы адаптивного оценивания состояния установок комплексной подготовки газа // Кимёвий технология. Назорат ва бошқарув. Халқаро илмий-техникавий журнал. 2013, № 3, 86-89 бет
8. Филимонов Н.Б. Концепция многорежимного регулирования // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками: Межвуз. сб. науч. тр. - Новосибирск: НЭТИ, 1988. - С. 88-92.

УДК 532.595.2:532.529

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА С УЧЁТОМ РАЗРЫВА СПЛОШНОСТИ ПОТОКА

¹Жонкobilов Собир Улугмуродович - PhD, доцент, E-mail: jonkobilovsobir@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0619-936X>

¹Чулиев Махматмурод Норбоевич - ст.преподаватель, e-mail:
chulievmaxmatmurod@gmail.com

¹Баходиров Шохрух Баходир угли - ассистент, E-mail: bahodirovshohrux2613@gmail.com

²Жонкobilов Бектимер Улугмуродович - магистрант, E-mail: jonkobilovbektemir@mail.ru

¹Каршинский институт ирригации и агротехнологий Национального исследовательского университета «ТИИИМСХ». г. Карши, Республика Узбекистан.

²Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Республика Узбекистан.

Аннотация. В статье приведены результаты исследования по определению максимального напора гидравлического удара с учетом разрыва неразрывности потока. Получены расчетные аналитические зависимости для определения максимального напора гидравлического удара с учетом профиля напорных трубопроводов. Достоверности полученных зависимостей обоснованы экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: гидроудар от повышения давления, насосная установка, насос, нарушение сплошности потока, прочность трубопровода, реальная жидкость.

Abstract. The article presents the results of a study to determine the maximum pressure of a hydraulic shock, taking into account the rupture of the flow discontinuity. Calculated analytical dependences

for determining the maximum pressure of a hydraulic shock, taking into account the profile of pressure pipelines, are obtained. The reliability of the obtained dependencies is justified by experimental studies.

Key words: water hammer from pressure increase, pumping unit, pump, flow continuity break, pipeline strength, real liquid.

Введение. В настоящее время важное значение имеет расчет напорных трубопроводов на гидравлический удар при повышении давления. Более точный расчет позволяет применять трубы без излишних запасов прочности, более правильно подбирать для них средства защиты [1,2,3,4].

Задача уточнения существующих и разработки новых методов расчета гидравлического удара требует проведения новых теоретических и экспериментальных исследований гидравлического удара в реальной (вязкой) жидкости [5,6,7,8].

Целью исследований настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование гидравлического удара при повышении давления в простых водоводах с учетом сил трения и разработка достаточно простого для практического применения способа его расчета [4,5,6].

В настоящее время можно считать, что теория гидравлического удара без разрыва неразрывности идеального потока разработана в достаточной степени [1,2,3,4]. Развитой в достаточной степени теорией гидравлического удара реальной жидкости в настоящее время мы еще не располагаем. Последнее объясняется определенными трудностями математического порядка, которые возникают при решении различных задач по гидравлическому удару после введения в исходные дифференциальные уравнения неустановившегося движения жидкости сил вязкости. Нерешенными до сих пор остаются, такие вопросы, как учет потерь энергии при “восстановлении” давления трения в фазе удара, затухание ударных колебаний во времени и т.д. [5,6,7].

Гидравлический удар с разрывом сплошности потока является одной из наиболее сложных задач в теории неустановившегося движения реальной жидкости в трубах [1,2,3,5]. Анализ исследований гидравлического удара с разрывом сплошности потока А.Ф.Мостовского, Д.Н.Смирнова, Л.Ф.Мошнина и ряда других авторов показывает, что до сих пор еще нет единого мнения не только о величине, но даже о возможности повышения ударного давления сверх значения, определяемого по формуле Н.Е.Жуковского [1,2,3,5,8,9].

Методика исследований. В работе решением дифференциальных уравнений неустановившегося движения маловязкой реальной жидкости при квадратичном законе трения решается задача учета потерь энергии при “восстановлении” давления трения в фазе удара [5,8,9]. Рассматривается вопрос о максимально возможном давлении при гидравлическом ударе с разрывом сплошности потока [3,4,5]. Для оценки точности полученных решений их результаты сопоставляются с данными экспериментов, произведенных на напорных трубопроводах.

В работе рассматривается решение задачи учета потерь напора на трение при прямом гидравлическом ударе, который вызывается мгновенным закрытием затвора, начинается с повышения давления [3,4,5]. Анализ имеющихся решений показывает, что они математически не достаточно корректны, а окончательные результаты разноречивы [5,6,7].

За исходные принимаются уравнения гидромеханики реальной жидкости [1,2,6,9]:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial H}{\partial x} &= \frac{1}{g} \left(\frac{\partial g}{\partial t} + \frac{\lambda}{2d} g^2 \right) \\ -\frac{\partial H}{\partial x} &= \frac{c^2}{g} \frac{\partial g}{\partial x} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где H – напор; ϑ – скорость движения воды; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; g – ускорение силы тяжести; d – диаметр трубопровода; c – скорость распространения ударной волны; χ – продольная координата; t – время.

Уравнения (1) интегрируются при начальном условии

$$0 < x \leq l \quad \vartheta = \vartheta_0, \quad H = H_0 \quad \text{при } t \leq 0$$

и граничных условиях [2,3]

$$\begin{aligned} x=0 \quad H=H_0=\text{const} \quad \text{при любом } t; \\ x = |l - ct| \vartheta = \frac{g}{c} h_m \left(\frac{l-x}{l} \right) \quad \text{при } 0 \leq t \leq 2l/c, \end{aligned} \quad (2)$$

где ϑ_0 – начальная скорость движения воды; H_0 – статический напор; h_m – потери напора на трение по всей длине трубопровода при начальной скорости движения воды, определяемые по формуле Дарси-Вейсбаха.

Граничное условие (2) получено из равенства живой силы, обуславливающей скорость движения воды при неустановившемся движении, и работы, которая затрачивается на деформацию трубопровода и воды разностью давлений, возникающей при гидравлическом ударе в двух смежных сечениях трубопровода из-за потерь напора на трение до удара [2,3].

В результате решения определили, что

$$H = H_0 + \frac{c \vartheta_0}{g} - \frac{\alpha^2}{3} h_m, \quad (3)$$

где $\alpha = h_{тг}(c\vartheta_0)^{-1}$ – отношение потерь напора на трение при установившемся режиме течения к величине повышения давления при ударе по формуле Н.Е.Жуковского [1].

В зависимости (3) последний член выражает потерю энергии на трение за фазу удара. Из этой зависимости не трудно установить, что для значений $0 < \alpha \leq 0,5$ с практически приемлемой точностью максимально возможное давление при ударе можно определять с некоторым запасом по формуле Н.Е.Жуковского [1]

$$H = H_0 + \frac{c \vartheta_0}{g}.$$

Таким образом, при расчете прямого гидравлического удара, начинающегося с повышения давления, когда относительные потери на трение (α) не превышают 0,5, ударное давление с практически приемлемой точностью можно определять по формуле Н.Е.Жуковского, т.е. потерями энергии при “восстановлении” давления трения в фазе удара можно пренебречь.

Следует отметить, что условию $\alpha \leq 0,5$ отвечают многие водоводы систем водоснабжения. Данные опытов различных авторов и проведенных нами (расхождение до 5%) подтверждают правильность полученного решения.

В работе также излагаются результаты теоретического и экспериментального исследования вопроса о максимально возможном давлении при гидравлическом ударе с разрывом неразрывности потока.

Гидравлический удар, сопровождаемый кавитацией потока [7], следует рассматривать как один из видов неустановившегося движения двухфазной среды (жидкость-газ). Однако в настоящее время гидравлика не располагает какой-либо замкнутой системой дифференциальных уравнений, описывающих данный режим течения жидкости [7]. Поэтому при выводе аналитических зависимостей для расчета гидравлического удара с разрывом неразрывности потока приходится прибегать к упрощениям и схематизации этого сложного явления.

При решении задачи сначала были приняты следующие условия

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq l \quad \vartheta = \vartheta_0 \quad H = H_0 \quad \text{при } t \leq 0; \\ x = l \quad H = H_0 = \text{const} \quad \text{при любом } t \geq 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где h_v – величина вакуума в трубопроводе при гидравлическом ударе в фазе понижения давления.

Физический смысл условия (4) заключается в том, что при гидравлическом ударе скорость движения воды в обратном направлении, которая достигается за счет заполнения пустот в зоны разрыва, на границе с этой зоной может быть только равна или меньше скорости движения воды в прямом направлении. Это ограничение следует из закона сохранения энергии и физического условия, заключающегося в том, что при ударе давления в трубопроводе не может упасть ниже некоторого предела [2,3].

На основании общего интеграла Н.Е.Жуковского дается решение рассматриваемой задачи для случая напорного волнового движения упругой идеальной жидкости [1]. При этом принимается, что граница раздела зоны разрыва неразрывности и сплошного потока представляет собой вертикальную плоскость, а переходная кавитационная область отсутствует.

Согласно этому решению, максимально возможное давление при гидравлическом ударе с разрывом неразрывности потока составляет, отсчитывая от атмосферного, величину [7].

$$H = H_0 + \frac{c \mathcal{G}_0}{g} + \Delta h, \quad (5)$$

где, $0 \leq \Delta h \leq H_0$ – добавка давления благодаря упругости воды и трубопровода сверх величины, определяемой по формуле Н.Е.Жуковского [1].

В реальных условиях за счет потерь напора на трение в трубопроводы ударное движение снижается по сравнению со значением, исчисляемым по (5). Учитывая потери напора на трение по А.Ф.Мостовскому [2], граничное условие (4) представляется как

$$x=0 \quad \mathcal{G} \leq \left| \mathcal{G}_0 \sqrt{\frac{H_0 + h_e}{H_0 + h_m + h_e}} \right|, \quad H \geq h_e = \text{const} \quad \text{при } t > 0. \quad (6)$$

Результаты исследований. В процессе эксплуатации меняется гидравлическая характеристика водовода, может поменяться и режим подачи воды. Так как давление при гидравлическом ударе пульсирующего характера может как увеличиваться, так и уменьшаться при изменении скорости движения воды, в зависимости (5) значение Δh принимается максимально возможное и равное H_0 . В этом случае, пренебрегая потерями энергии, имеющими место при восстановлении статического напора и при увеличении обратной скорости в трубопроводе сверх определяемой по (6) величины, из (5) получили [4,6]:

$$H = (H_0 - h_e) + \frac{c \mathcal{G}_0}{g} \sqrt{\frac{H_0 + h_e}{H_0 + h_m + h_e}} + (H_0 + h_e) \frac{H_0 + h_e}{H_0 + h_m + h_e}. \quad (7)$$

Зависимость (7) учитывает упругость воды, трубопровода и силы вязкости и дает возможность определить максимально возможное давление при гидравлическом ударе с разрывом неразрывности потока.

Результаты расчетов по зависимости (7) сопоставлены с опытами [2,3]. Совпадение опытных данных с теоретическими имеет достаточную сходимость.

Экспериментальное изучение гидравлического удара с разрывом неразрывности потока вышеперечисленными исследователями [2,3] проводилось на установках с горизонтальными трубопроводами. Для исследования рассматриваемого удара в наклонном трубопроводе была смонтирована опытная установка, которая представлена стальным трубопроводом $d=70$ мм, длиной 445 м и со статическими напорами соответственно 51,8 м. и 35,9 м. На расстоянии 2,5 м от насоса стеклянный трубопровод через трехходовой пробковый кран подключался к стальному трубопроводу, что давало возможность переключать подачу воды насосом на один из двух трубопроводов. Начальный участок стального трубопровода длиной 171 м без ярко выраженных переломов проложен с крутым подъемом до отметки +40,6 м, остальная часть без переломов имело сравнительно небольшой подъем +11,2 м. На установке предусматривалась возможность создавать гидравлический удар как с понижением, так и с повышением давления. Коэффициенты гидравлического сопротивления трубопроводов определялись опытным путем [4,7].

Исследования проводились при скоростях установившегося движения воды в стальном трубопроводе в пределах от 0,1 м/с до 2,2 м/с, в стеклянном – от 0,1 м/с до 2,6 м/с. Гидравлический удар создавался путем практически мгновенного (0,02 – 0,05 сек.) закрытия пробкового крана. Запись колебаний давлений при гидравлическом ударе осуществлялась с помощью специально созданного прибора с подачей сигнала на компьютер. В процессе проведения опытов разрывы неразрывности потока в трубопроводе наблюдались визуально (в стальном трубопроводе через прозрачные вставки у пробкового крана и на переломе). Методика проведения экспериментов и обработки опытных данных приводится в [4,6].

Всего было выполнено три серии опытов. В опытах воспроизводился гидравлический удар, начинающийся с повышения давления. Гидравлический удар, начинающийся с повышения давления, исследовался на всем стальном и на стеклянном трубопроводах.

Данные опытов показали, что во всех сериях, в некотором диапазоне скоростей, при котором наблюдался разрыв сплошности потока, имеет место превышение ударного давления над величиной, определяемой по формуле Н.Е.Жуковского [1]. При этом данный диапазон скоростей в зависимости от гидравлической характеристики трубопровода и высоты колонны воды над местом разрыва меняется в пределах от 0,1 м/с до 1,8 м/с. Максимальное превышение ударного давления над значением, исчисленным по формуле Н.Е.Жуковского [1], на трубопроводах без переломов равно статическому напору. На трубопроводах с переломом это превышение равно разности отметок точки перелома (места верхнего разрыва неразрывности потока) и уровня воды в баке. С увеличением скорости движения воды до удара за счет действия сил вязкости ударное давление становится меньше величины по формуле Н.Е.Жуковского [1].

Превышение ударного давления над величиной по решению А.Ф.Мостовского [2] имеет место во всем диапазоне скоростей, при котором наблюдался разрыв неразрывности потока. При этом максимальное значение этого превышения на трубопроводах без переломов равно статическому напору, а на трубопроводах с переломом – высоте колонны воды над местом верхнего разрыва, т.е. разности отметок точки перелома и уровня воды в баке. С увеличением скорости движения воды до удара под влиянием сил трения прибавка ударного давления, возникающая благодаря упругости воды и трубопровода, (в формуле (5) величина Δh), уменьшается [4].

Расчетные кривые по зависимости (7) вполне удовлетворительно охватывают сверху данные опытов на трубопроводах без переломов.

В опытах на трубопроводах с переломом напор, возникающий в результате удара оседающей нижней колонны о закрытый пробковый кран, всегда был меньше давления, определяемого по Н.Е.Жуковскому [1]. Максимальное колебание давления всегда было следствием соударения верхней колонны о нижнюю. Поэтому по аналогии с зависимостью (7) для трубопроводов с переломом получили [4,6]:

$$H = (H_0 - h_e) + \frac{c g_0}{g} \sqrt{\frac{h + h_e}{h + h'_m + h_e}} + (h + h_e) \frac{h + h_e}{h + h'_m + h_e}, \quad (8)$$

где h – высота верхней колонны (разность отметок точки перелома и уровня воды в баке);

$$h'_m = \frac{\lambda l' g_0^2}{d 2g},$$

l' - длина трубопровода от места перелома до конца трубопровода.

Расчетные кривые по зависимости (8) удовлетворительно охватывают данные опытов на трубопроводах с переломом. Расчетные данные по зависимостям (7) и (8) удовлетворительно согласуются с опытными данными гидравлического удара, начинающегося с повышения давления (табл. 1).

Поскольку на трубопроводе длиной 265 м верхняя часть после перелома была практически горизонтальна, т.е. высота колонны воды над верхним разрывом равнялась 3,4 м, то в опытах этой серии превышение ударного давления значения по решению.

А.Ф.Мостовского [2] практически не наблюдалось. Опытные точки легли по решению А.Ф.Мостовского, что и следует из теоретической зависимости (8) при $h \rightarrow 0$.

В некоторых опытах на трубопроводах с небольшими гидравлическими сопротивлениями интересен факт увеличения ударного колебания в последующей фазе повышения давления по сравнению с предыдущей, что может быть объяснено пульсирующим характером прибавки давления благодаря упругости трубопровода и воды при гидравлическом ударе с разрывом неразрывности потока [4]. Так как гидравлическое сопротивление сравнительно невелико, то потери напора на трение за фазу удара также небольшие. Уменьшение за счет трения скорости движения воды в обратном направлении в последующей фазе в некоторых случаях приводит к увеличению прибавки давления благодаря упругости трубопровода и воды. В результате увеличения этой прибавки не только покрывается потеря энергии на трение, но и увеличивается ударное колебание. Визуальное наблюдение и анализ экспериментальных данных позволили установить некоторые положения, характеризующие с качественной стороны сложный процесс образования и развития кавитационной полости в трубопроводе при гидравлическом ударе [4,6].

Таблица 1

Сопоставление расчетных данных с характерными опытами гидравлического удара, начинающегося с повышения давления и сопровождающегося разрывом сплошности потока

Скорость движения воды м/сек.	Статический напор, м	Разность отметок конца трубопровода и точки его перелома, м	Потери напора на трение, м	Напор по формуле Н.Е.Жуковского, м	Напор во второй фазе повышения давления		
					Опытный м	по зависимости (7), м	по зависимости (8), м
Наклонный трубопровод без переломов							
0,40	35,9	-	0,3	80,7	111,0	116,0	-
0,69	35,9	-	0,8	113,3	152,0	147,4	-
1,05	35,9	-	1,7	153,7	186,0	185,8	-
1,30	35,9	-	2,7	181,5	205,0	210,0	-
1,54	35,9	-	3,8	208,7	226,0	233,7	-
Наклонный трубопровод с переломом							
0,30	51,8	11,2	0,6	84,1	94,0	-	94,2
0,53	51,8	11,2	1,9	109,1	123,0	-	117,4
0,80	51,8	11,2	4,3	138,2	146,0	-	141,3
1,0	51,8	11,2	6,7	159,8	157,0	-	157,2
1,70	51,8	11,2	19,3	235,6	202,0	-	199,6

Таким образом, при гидравлическом ударе с разрывом неразрывности потока как в горизонтальном трубопроводе, так и в наклонном без переломов, наибольшее полное давление можно определять по зависимости (7) [4,6].

В наклонном трубопроводе с переломом при разрыве в процессе удара столба воды в переломной точке полное давление от соударения верхней колонны жидкости о нижнюю, находящуюся в состоянии покоя, можно определять по зависимости (8) [4,6].

Величина добавки давления, возникающая благодаря упругости трубопровода и воды, при гидравлическом ударе с разрывом столба жидкости при всех прочих равных условиях зависит от геометрических и гидравлических параметров трубопровода [6].

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. В результате теоретического решения получено граничное условие (2) и решением дифференциальных уравнений неустановившегося движения реальной маловязкой жидкости при квадратичном законе трения получена расчетная зависимость (3). Последняя позволяет

учитывать потерю энергии, которая обуславливается дополнительными местными передвижками воды при «восстановлении» давления трения в фазе удара.

2. Исследованием решения (3) и сопоставлением его с данными экспериментов установлено, что при расчете прямого гидравлического удара, начинающегося с повышения давления и протекающего без разрыва неразрывности потока, ударное давление с практически приемлемой точностью можно определять по формуле Н.Е. Жуковского, когда относительные потери на трение не превышает 0,5. Этому условию отвечают многие трубопроводы напорных систем.

3. Исходя из энергетического баланса, предложено граничное условие: без учета сил вязкости (4); с учетом сил вязкости (6). С использованием общего решения дифференциальных уравнений неустановившегося движения Н.Е. Жуковского на основании условий (4) и (6) для определения максимально возможного давления при прямом гидравлическом ударе с разрывом неразрывности потока получены зависимости: без учета сил вязкости (5); с учетом сил вязкости в трубопроводах без переломов (7) и в трубопроводах с переломом (8).

4. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлены пределы и характер изменения величины добавки давления, возникающей благодаря упругости трубопровода и жидкости, при гидравлическом ударе с разрывом неразрывности потока в зависимости от изменения скорости движения жидкости до удара, геометрических и гидравлических параметров трубопровода. Сопоставление расчетных данных по зависимостям (7) и (8) и экспериментальных максимальных значений ударных давлений показывает их хорошее совпадение.

5. Полученные расчетные зависимости позволяют производить достаточно точный инженерный расчет возможного ударного давления и, следовательно, правильно подбирать средства защиты водоводов от гидравлического удара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. – М., Гостехиздат, 1949. – 104 с.
2. Мостовский А.Ф. Исследования гидравлического удара в трубах при малых напорах. – Труды МИИТа, М., 1929, вып.11, с.263-304.
3. Мошнин Л.Ф., Тимофеева Е.Т. Указания по защите водоводов от гидравлического удара. – М., Стройиздат, 1961, - 227 с.
4. Жонкобилов У.У. Определение максимального давления при гидравлическом ударе в трубах. Инновационное развитие. Международный научный журнал. г. Пермь, №4, 2018, с. 25-27.
5. Жонкобилов У.У. Исследование гидравлического удара с разрывом сплошности потока в трубопроводах. Қайта тикланувчи энергетиканинг замонавий муаммолари. Республика илмий – амалий анжумани. Қарши, 2018 йил 18-19 май, 505-507 б.
6. Жонкобилов У.У. Исследование максимальных напоров при гидравлическом ударе с разрывом сплошности в газожидкостном напорном потоке.// журнал «Вестник ТашГТУ», №4, Ташкент, 2018. – 137-141.
7. Jonkobilov U.U. About calculation of a hydraulic hitting absorber - air-hydraulic cap with diaphragm. //European Science review Scientific journal Austria, Vienna. № 9-10. 2018-P.192-194.
8. P.F. Boulos, B.W. Karney, D.J. Wood, S. Lingireddy, Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems, Am. Water Works Assoc. 97 (5) (2005) 111-124.
9. A. Triki, Further investigation on water-hammer control inline strategy in watersupply systems, J. Water Supply Res. Technol. Aqua 67 (1) (2018) 30-43.